



**OBJECTIVE LENS CONSISTING OF CRYSTAL LENSES**

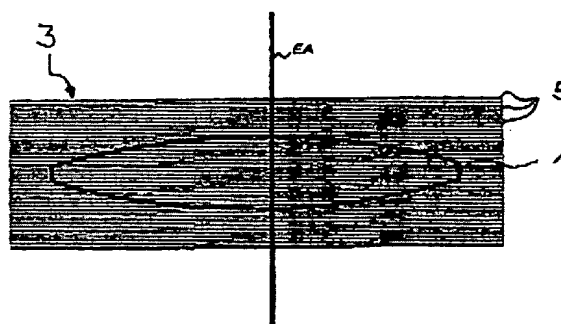
**Patent number:** DE10210782  
**Publication date:** 2003-10-09  
**Inventor:** KRAEHMER DANIEL (DE); ZACZEK CHRISTOPH (DE)  
**Applicant:** CARL ZEISS SMT AG (DE)  
**Classification:**  
- **International:** G02B13/14; G02B1/02; G02B11/00; G02B17/08; G02B1/10; G03F7/20  
- **European:** G02B1/02, G02B5/30R, G03F7/20T16, G03F7/20T26  
**Application number:** DE20021010782 20020312  
**Priority number(s):** DE20021010782 20020312

**Also published as:**

 WO03077007 (A3)  
 WO03077007 (A2)

Abstract not available for DE10210782  
Abstract of correspondent: **WO03077007**

An objective lens, especially a projection lens for a microlithographic projection illumination system comprising at least one fluoride crystal lens. The disruptive effect of double refraction is reduced by the fact that the lens is a lens (100) having an axis which is approximately perpendicular in relation to the crystal planes {100} or the equivalent crystal planes of the fluoride crystal. In objective lenses consisting of at least two fluoride crystal lenses it is advantageous to arrange the fluoride crystal lenses in such a way that they are skewed in relation to each other. The lens axes of the fluid crystal lenses can point in direction  $\langle 111 \rangle$  or  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$  in addition to direction  $\langle 100 \rangle$  of the crystal. The disruptive effect of double refraction can also be reduced by using groups with skewed (110) lenses and groups with (111) lenses or groups with (110) lenses. The disruptive effect of double refraction can be further reduced by providing an optical element with a compensating coating.



---

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



⑩ **BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 102 10 782 A 1**

② Aktenzeichen: 102 10 782.3  
② Anmeldetag: 12. 3. 2002  
④ Offenlegungstag: 9. 10. 2003

⑤ Int. Cl. 7:  
**G 02 B 13/14**  
G 02 B 1/02  
G 02 B 11/00  
G 02 B 17/08  
G 02 B 1/10  
G 03 F 7/20

**DE 102 10 782 A 1**

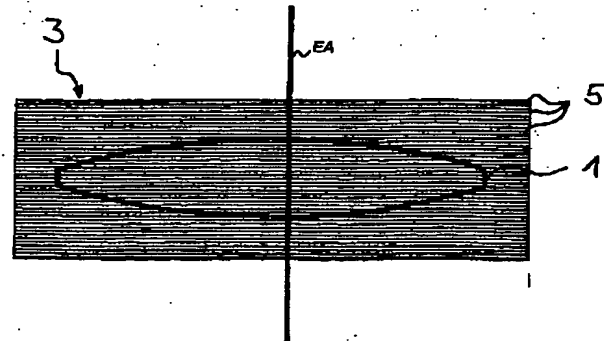
⑦ Anmelder:  
Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen, DE

⑦ Erfinder:  
Krähmer, Daniel, Dr., 73431 Aalen, DE; Zaczek,  
Christoph, 73540 Heubach, DE

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤④ **Objektiv mit Kristall-Linsen**

⑤⑦ Objektiv, insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit mindestens einer Fluorid-Kristall-Linse. Eine Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man, wenn diese Linse eine (100)-Linse mit einer Linsenachse ist, welche annähernd senkrecht auf den (100)-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht. Bei Objektiven mit mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen ist es günstig, wenn die Fluorid-Kristall-Linsen gegeneinander verdreht angeordnet sind. Die Linsenachsen der Fluorid-Kristall-Linsen können dabei neben der <100>-Kristallrichtung auch in die <111>- oder in die <110>-Kristallrichtung weisen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch den gleichzeitigen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen oder (110)-Linsen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch die Belegung eines optischen Elements mit einer Kompensations-Beschichtung.



**DE 102 10 782 A 1**

[0001] Die Erfindung betrifft ein Objektiv nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0002] Derartige Projektionsobjektive sind aus der US 6,201,634 bekannt. Dort ist offenbart, daß bei der Herstellung von Fluorid-Kristall-Linsen idealerweise die Linsenachsen senkrecht zu den {111}-Kristallebenen der Fluorid-Kristalle ausgerichtet werden, um die Spannungsdoppelbrechung zu minimieren. Die US 6,201,634 geht dabei davon aus, daß Fluorid-Kristalle keine intrinsische Doppelbrechung aufweisen.

[0003] Aus der Internet-Publikation "Preliminary Determination of an Intrinsic Birefringence in CaF<sub>2</sub>" von John H. Burnett, Eric L. Shirley, and Zachary H. Levine, NIST Gaithersburg MD 20899 USA (verbreitet am 07.05.01) ist jedoch bekannt, daß Kalzium-Fluorid-Einkristalle auch nicht spannungsinduzierte, also intrinsische Doppelbrechung aufweisen. Die dort präsentierten Messungen zeigen, daß bei Strahlausbreitung in der <110>-Kristallrichtung eine Doppelbrechung von  $(6.5 \pm 0.4)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 156.1$  nm, von  $(3.6 \pm 0.2)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 193.09$  nm und von  $(1.2 \pm 0.1)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 253.65$  nm für Kalzium-Fluorid auftritt. Bei einer Strahlausbreitung in der <100>-Kristallrichtung und in der <111>-Kristallrichtung weist Kalzium-Fluorid dagegen keine intrinsische Doppelbrechung auf, wie dies auch von der Theorie vorhergesagt wird. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit stark richtungsabhängig und nimmt mit kleiner werdender Wellenlänge deutlich zu.

[0004] Die Indizierung der Kristallrichtungen wird im folgenden zwischen den Zeichen "<" und ">" angegeben, die Indizierung der Kristallebenen zwischen den Zeichen "{" und "}". Die Kristallrichtung gibt dabei immer die Richtung der Flächennormalen der entsprechenden Kristallebene an. So zeigt die Kristallrichtung <100> in Richtung der Flächennormalen der Kristallebene {100}. Die kubischen Kristalle, zu denen die Fluorid-Kristalle gehören, weisen die Hauptkristallrichtungen <110>, <110>, <110>, <110>, <101>, <101>, <101>, <101>, <011>, <011>, <011>, <011>, <111>, <111>, <111>, <111>, <111>, <111>, <100>, <010>, <001>, <100>, <010> und <001> auf. Die Hauptkristallrichtungen <100>, <010>, <001>, <100>, <010> und <001> sind auf Grund der Symmetrieeigenschaften der kubischen Kristalle äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix "(100)-" erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix "(100)". Die Hauptkristallrichtungen <110>, <110>, <110>, <110>, <101>, <101>, <101>, <101>, <011>, <011>, <011> und <011> sind ebenso äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix "(110)-" erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix "(110)". Die Hauptkristallrichtungen <111>, <111>, <111>, <111>, <111>, <111> und <111> sind ebenso äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix "(111)-" erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix "(111)". Aussagen, die im folgenden zu einer der zuvor genannten Hauptkristallrichtungen getroffen werden, gelten immer auch für die äquivalenten Hauptkristallrichtungen.

[0005] Projektionsobjektive und Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen sind beispielsweise aus der Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 der Anmelderin und den darin zitierten Schriften bekannt. Die Ausführungsbeispiele dieser Anmeldung zeigen geeignete rein refraktive und katadioptrische Projektionsobjektive mit numerischen Aperturen von 0.8 und 0.9, bei einer Betriebswellenlänge von 193 nm sowie 157 nm.

[0006] Die Drehung von Linsenelementen zur Kompensation von Doppelbrechungseffekten ist auch in der Patentanmeldung "Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie, Optisches System und Herstellverfahren" (DE 101 23 725.1) mit dem Aktenzeichen des Anmelders 01055P und dem Einreichungstag 15.05.2001 beschrieben. Der Inhalt dieser Anmeldung soll auch Teil der vorliegenden Anmeldung sein.

[0007] Aufgabe der Erfindung ist es, Projektionsobjektive für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage anzugeben, bei denen der Einfluß der Doppelbrechung, insbesondere der inintrinsic Doppelbrechung wesentlich reduziert ist.

[0008] Gelöst wird diese Aufgabe mit einem Objektiv gemäß Anspruch 1, 8 und 31, einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 47, einem Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen gemäß Anspruch 48, einem Verfahren zur Herstellung von Objektiven gemäß Anspruch 49, einem Verfahren zur Kompensation von Doppelbrechungseffekten gemäß Anspruch 53 und einem Linsenherstellverfahren gemäß Anspruch 54.

[0009] Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

[0010] Um den Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung zu minimieren, schlägt Anspruch 1 vor, bei Linsen aus Fluorid-Kristall die Linsenachsen so auszurichten, daß sie mit der <100>-Kristallrichtung zusammenfallen. Die Linsenachsen fallen dann mit einer Hauptkristallrichtung zusammen, wenn die maximale Abweichung zwischen Linsenachse und Hauptkristallrichtung kleiner 5° ist. Dabei müssen nicht alle Fluorid-Kristall-Linsen des Objektives eine derartige Ausrichtung der Kristallebenen aufweisen. Diejenigen Linsen, bei denen die Linsenachsen senkrecht auf den {100}-Kristallebenen stehen, werden im Folgenden auch als (100)-Linsen bezeichnet. Die Ausrichtung der Linsenachse in <100>-Kristallrichtung hat den Vorteil, daß sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung, der sich bei Lichtausbreitung in <110>-Kristallrichtung ergibt, erst bei höheren Öffnungswinkeln der Lichtstrahlen bemerkbar macht als für eine Ausrichtung der Linsenachse in <111>-Kristallrichtung. Unter Öffnungswinkel versteht man in diesem Zusammenhang den Winkel zwischen einem Lichtstrahl und der optischen Achse außerhalb einer Linse und zwischen dem Lichtstrahl und der Linsenachse innerhalb einer Linse. Erst wenn die Öffnungswinkel in den Bereich des Winkels zwischen der <100>-Kristallrichtung und der <110>-Kristallrichtung kommen, spüren die entsprechenden Lichtstrahlen den Einfluss der Doppelbrechung. Der Winkel zwischen der <110>-Kristallrichtung und der <100>-Kristallrichtung beträgt dabei 45°. Wäre die Linsenachse dagegen in <111>-Kristallrichtung ausgerichtet, so würde sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung schon bei kleineren Öffnungswinkeln bemerkbar machen, da der Winkel zwischen der <110>-Kristallrichtung und der <111>-Kristallrichtung nur 35° beträgt.

[0011] Wird die Winkelabhängigkeit der Doppelbrechung beispielsweise durch das Herstellverfahren des Fluorid-Kristalls oder die mechanische Beanspruchung des Linse, insbesondere Spannungsdoppelbrechung, hervorgerufen, so kön-

nen die offenbarten Lösungsansätze selbstverständlich ebenfalls zur Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung angewendet werden.

[0012] Die Linsenachse ist dabei beispielsweise durch eine Symmetrieachse einer rotationssymmetrischen Linse gegeben. Weist die Linse keine Symmetrieachse auf, so kann die Linsenachse durch die Mitte eines einfallenden Strahlbündels oder durch eine Gerade gegeben sein, bezüglich der die Strahlwinkel aller Lichtstrahlen innerhalb der Linse minimal sind. Als Linsen kommen beispielsweise refraktive oder diffraktive Linsen sowie Korrekturplatten mit Freiformkorrekturflächen in Frage. Auch Planplatten werden als Linsen angesehen, sofern sie im Strahlengang des Objektivs angeordnet sind. Die Linsenachse einer Planplatte steht dabei senkrecht auf den planen Linsenoberflächen.

[0013] Vorzugsweise handelt es sich jedoch bei den Linsen um rotationssymmetrische Linsen.

[0014] Objektive weisen eine optische Achse auf, welche von der Objektebene zur Bildebene verläuft. Vorzugsweise sind die (100)-Linsen zentriert um diese optische Achse aufgebaut, so daß auch die Linsenachsen mit der optischen Achse zusammenfallen.

[0015] Vorteilhaft läßt sich die Erfindung bei Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage einsetzen, da für diese Objektive extrem hohe Anforderungen an das Auflösungsvermögen gestellt werden. Aber auch bei Prüfobjektiven, mit denen beispielsweise Linsen für Projektionsobjektive durch Vermessung von Wellenfronten mit großer Öffnung getestet werden, wirkt sich der Einfluß der Doppelbrechung störend aus.

[0016] Bei Objektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen, insbesondere größer 0,7, treten innerhalb der (100)-Linsen Öffnungswinkel auf, die größer als 25°, insbesondere größer als 30° sind. Gerade bei diesen großen Öffnungswinkeln kommt die Erfindung zum Tragen, die Linsenachsen in <100>-Kristallrichtung zu orientieren. Wären die Linsenachsen in <111>-Kristallrichtung orientiert, so würden die Lichtstrahlen mit Öffnungswinkeln größer als 25°, insbesondere größer als 30° deutlicher den störenden Einfluß der Doppelbrechung spüren, wenn nicht eine der weiter unten beschriebenen Korrekturmaßnahmen angewandt wird.

[0017] Da andererseits der störende Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung bei einem Öffnungswinkel von 45° maximal werden kann, ist es vorteilhaft, das Projektionsobjektiv so ausulegen, daß alle Öffnungswinkel der Lichtstrahlen kleiner 45° sind, insbesondere kleiner gleich

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

sind, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet und  $n_{FK}$  die Brechzahl des Fluorid-Kristalls. Der Ausdruck

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

gibt dabei den Öffnungswinkel an, welcher der bildseitigen numerischen Apertur innerhalb einer Fluorid-Kristall-Linse entspricht, wenn an der Lichtstrahl an einer planen Grenzfläche gebrochen wird. Dies wird erreicht, indem die Linsen, die nahe an der Bildebene angeordnet sind, sammelnde Linsenflächen, plane Linsenflächen oder höchstens leicht zerstreulnde Linsenflächen aufweisen, wenn in Lichtrichtung nach der zerstreulnden Linsenfläche eine stärker sammelnde Linsenfläche folgt.

[0018] Große Öffnungswinkel treten hauptsächlich bei Linsen in der Nähe von Feldebene, insbesondere der Bildebene auf. Die (100)-Linsen sollten deshalb vorzugsweise im Bereich der Feldebene eingesetzt werden. Der Bereich, in dem die (100)-Linsen eingesetzt werden sollten, läßt sich über das Verhältnis der Linsendurchmessers zum Durchmesser der Blende bestimmen. So beträgt der Linsendurchmesser der (100)-Linsen vorzugsweise maximal 85%, insbesondere maximal 80% des Blendendurchmessers.

[0019] Bei Projektionsobjektiven treten die größten Öffnungswinkel in der Regel in dem der Bildebene am nächsten gelegenen Linse auf. Deshalb wird vorzugsweise bei dieser Linse die Linsenachse in Richtung der <100>-Kristallrichtung ausgerichtet.

[0020] Die intrinsische Doppelbrechung einer Fluorid-Kristall-Linse ist dabei nicht nur vom Öffnungswinkel eines Lichtstrahls, sondern auch vom Azimutwinkel des Lichtstrahls abhängig. So kann jeder Fluorid-Kristall-Linse eine Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  zugeordnet werden, die einerseits eine Funktion des Öffnungswinkels  $\theta_L$  und andererseits eine Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_L$  ist. Der Wert der Doppelbrechung  $\Delta n$  gibt dabei für eine durch den Öffnungswinkel  $\theta_L$  und den Azimutwinkel  $\alpha_L$  bestimmte Strahlrichtung das Verhältnis des optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände zum im Fluorid-Kristall zurückgelegten physikalischen Strahlweg in der Einheit [nm/cm] an. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit von den Strahlwegen und der Linsenform unabhängig. Den optischen Wegunterschied für einen Strahl erhält man entsprechend durch Multiplikation der Doppelbrechung mit dem zurückgelegten Strahlweg. Der Öffnungswinkel  $\theta_L$  wird zwischen der Strahlrichtung und der Linsenachse bestimmt, der Azimutwinkel  $\alpha_L$  zwischen der in die zur Linsenachse senkrecht stehenden Kristallebene projizierten Strahlrichtung und einer mit der Linse fest verknüpften Bezugsrichtung.

[0021] Die Winkelabhängigkeit der Doppelbrechungsverteilungen der einzelnen Fluorid-Kristall-Linsen führt dazu, daß die Strahlen eines Strahlbündels, das in der Bildebene des Objektivs auf einen Bildpunkt trifft, winkelabhängige optische Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfahren. Die optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  werden dabei in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta_R$  und des Azimutwinkels  $\alpha_R$  angegeben. Der Öffnungswinkel  $\theta_R$  eines Strahls wird dabei zwischen der Strahlrichtung und der optischen Achse in der Bildebene, der Azimutwinkel  $\alpha_R$  zwischen der in die Bildebene projizierten Strahlrichtung und einer festen Bezugsrichtung innerhalb der Bildebene bestimmt. Weist nun das Objektiv mindestens zwei Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-

Kristall auf, so ist es vorteilhaft, wenn die Linsenachsen dieser Linsen oder Linsenteile in eine Hauptkristallrichtung weisen und die Linsen oder Linsenteile derart gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  der optischen Wegunterschiede wesentlich reduzierte Werte im Vergleich zu einer Anordnung aufweist, bei der die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die Linsen oder Linsenteile gleich orientiert eingebaut sind. Da die Doppelbrechungsverteilungen der Linsen jedoch eine azimutale Abhängigkeit aufweisen, kann durch die verdrehte Anordnung der Linsen der Maximalwert der Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  um bis zu 20%, insbesondere um bis zu 25% im Vergleich zu einem gleich orientierten Einbau reduziert werden.

[0022] Unter Linsenteilen sind beispielsweise einzelne Linsen zu verstehen, die durch Ansprengen optisch nahtlos zu einer einzelnen Linse gefügt werden. Ganz allgemein bezeichnen Linsenteile die Bausteine einer einzelnen Linse, wobei die Linsenachsen der Linsenteile jeweils in Richtung der Linsenachse der einzelnen Linse weisen.

[0023] Durch den verdrehten Einbau der Fluorid-Kristall-Linsen kann insbesondere die Abhängigkeit der Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  vom Azimutwinkel  $\alpha_R$  deutlich reduziert werden, so daß sich eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  ergibt.

[0024] Zeigt die Linsenachse in eine Hauptkristallrichtung, so weist die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  der Linse eine k-zählige Azimutalsymmetrie auf. Beispielsweise zeigt die Doppelbrechungsverteilung einer (100)-Linse, bei der die Linsenachse in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung weist, eine 4-zählige Azimutalsymmetrie, die Doppelbrechungsverteilung einer (111)-Linse, bei der die Linsenachse in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist, eine 3-zählige Azimutalsymmetrie, und die Doppelbrechungsverteilung einer (110)-Linse, bei der die Linsenachse in  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung weist, eine 2-zählige Azimutalsymmetrie. Je nach der Zähligkeit der Azimutalsymmetrie werden nun die einzelnen Linsen oder Linsenteile einer Gruppe um vorgegebene Drehwinkel  $\gamma$  gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet. Die Drehwinkel  $\gamma$  werden dabei zwischen den Bezugsrichtungen von je zwei Linsen oder Linsenteilen gemessen. Für die Linsen einer Gruppe weisen die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung. Die Bezugsrichtungen der Linsen einer Gruppe sind so mit den Linsen verknüpft, daß die Doppelbrechungsverteilungen  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  ihr einen vorgegebenen Öffnungswinkel  $\theta_0$  den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen. Somit treten für alle Linsen einer Gruppe die azimutalen Bereiche mit maximaler Doppelbrechung bei den gleichen Azimutwinkeln auf. Für n Linsen einer Gruppe sind die Drehwinkel zwischen je zwei Linsen folgendermaßen gegeben:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$$

k gibt dabei die Zähligkeit der Azimutalsymmetrie, n die Zahl der Linsen einer Gruppe und m eine beliebige ganze Zahl an. Die Toleranz von  $\pm 10^\circ$  berücksichtigt die Tatsache, daß unter Umständen die Drehwinkel von den theoretisch idealen Winkeln abweichen, um andere Randbedingungen bei der Objektivjustage berücksichtigen zu können. Eine Abweichung vom idealen Drehwinkel führt zu einem nicht optimalen azimutalen Ausgleich der optischen Wegunterschiede der Linsen einer Gruppe. Dies kann jedoch in gewissen Grenzen toleriert werden.

[0025] Für (100)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ.$$

[0026] Umfasst die Gruppe zwei (100)-Linsen, so beträgt der Drehwinkel zwischen diesen beiden Linsen idealerweise  $45^\circ$ , beziehungsweise  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ ...

[0027] Für (111)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{n} + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ.$$

[0028] Für (110)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{180^\circ}{n} + m \cdot 180^\circ \pm 10^\circ.$$

[0029] Die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_G(\alpha_R, \theta_R)$  kann dabei aber auch für den Einfluß einer einzelnen Gruppe von Linsen angegeben werden, indem nur diese Linsen bei der Doppelbrechungsanalyse betrachtet werden und die anderen Linsen als nicht doppelbrechend angenommen werden.

[0030] Die Linsen einer Gruppe werden beispielsweise dadurch bestimmt, daß ein äußerster Aperturstrahl eines Strahlenbündels innerhalb dieser Linsen jeweils ähnliche Öffnungswinkel aufweist, wobei vorteilhafterweise die Öffnungswinkel des äußersten Aperturstrahls innerhalb dieser Linsen größer  $15^\circ$ , insbesondere größer  $20^\circ$  sind. Als äußerster Aperturstrahl wird ein Strahl bezeichnet, der von einem Objektpunkt ausgeht, dessen Strahlhöhe in der Blendenebene dem Radius der Blende entspricht und der somit in der Bildebene einen Winkel gemäß der bildseitigen numerischen Apertur aufweist. Die äußersten Aperturstrahlen werden deshalb zur Definition der Gruppen herangezogen, weil sie üblicherweise innerhalb der Linsen die größten Öffnungswinkel aufweisen und damit die größte Störung durch die Doppelbrechung erfahren. Die Bestimmung der optischen Wegdifferenz für zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen für die äußersten Aperturstrahlen ermöglicht somit Aussagen über die maximale Störung einer Wellenfront durch die Doppelbrechung.

[0031] Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der äußerste Aperturstrahl in diesen Linsen jeweils einen gleichen Strahlweg zurückgelegt. Durch diese Maßnahmen ergibt sich ein guter Ausgleich der azimutalen Beiträge zur Verteilung der optischen Wegdifferenzen, die von den einzelnen Linsen einer Gruppe hervorgerufen werden, so daß die resultierende Ver-

teilung der optischen Wegdifferenzen nahezu rotationssymmetrisch ist.

[0032] Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der äußerste Aperturstrahl in jeder Linse einer Gruppe bei gleicher Orientierung der Linsen ähnlich große optische Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfährt. Ist diese Bedingung erfüllt, tritt bei verdrehter Anordnung dieser Linsen ein optimaler Ausgleich der azimutalen Beiträge auf.

[0033] Im Fall von planparallelen benachbarten (100)- oder (111)-Linsen gleicher Dicke oder von vier planparallelen benachbarten (110)-Linsen gleicher Dicke erhält man eine rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  durch Drehung der Linsen gemäß obigen Formeln. Auch bei Linsen mit gekrümmten Oberflächen läßt sich durch geschickte Auswahl der Linsen einer Gruppe oder durch eine entsprechende Wahl der Dicken und der Radien der Linsen bereits durch Drehen von zwei Linsen eine näherungsweise rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielen. Bei (100)-Linsen oder (111)-Linsen ist es vorteilhaft, wenn eine Gruppe zwei Linsen aufweist. Bei (110)-Linsen stellt sich eine näherungsweise rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegdifferenzen für vier Linsen in einer Gruppe ein.

[0034] Besonders effektiv wird die Verdrehung der Linsen dann, wenn die Linsen benachbart angeordnet sind. Besonders vorteilhaft ist es, eine Linse in zwei Teile aufzuteilen und die Linsenteile gegeneinander verdreht optisch nahtlos zu fügen, beispielsweise durch Ansprengen.

[0035] Bei einem Projektionsobjektiv mit einer Vielzahl von Linsen ist es günstig, mehrere Gruppen von Linsen zu bilden. Dabei sind die Linsen einer Gruppe derart um die Linsenachsen verdreht angeordnet, daß die resultierende Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  vom Azimutwinkel nahezu unabhängig ist.

[0036] Während nun die von den einzelnen Gruppen hervorgerufenen Verteilungen  $\Delta OPL_G(\alpha_R, \theta_R)$  durch das gegenseitige Verdrehen der Linsen einer Gruppe nahezu unabhängig vom Azimutwinkel sind, kann der Maximalwert der Gesamtverteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  des gesamten Objektivs dadurch deutlich reduziert werden, daß das Projektionsobjektiv sowohl mindestens eine Gruppe mit (100)-Linsen als auch mindestens eine Gruppe mit (111)-Linsen aufweist. Eine gute Kompensation ist auch möglich, wenn innerhalb des Objektivs neben einer Gruppe mit (100)-Linsen eine Gruppe mit (110)-Linsen angeordnet ist.

[0037] Die Kompensation ist möglich, weil die Doppelbrechung nicht nur einen absoluten Wert, sondern auch eine Richtung aufweist. Die Kompensation des störenden Einflusses der Doppelbrechung ist dann optimal, wenn die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$ , welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen Gruppen mit (100)-Linsen hervorgerufen wird, und die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$ , welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen Gruppen mit (111)-Linsen oder (110)-Linsen hervorgerufen wird, ähnlich hohe Maximalwerte aufweist.

[0038] Eine weitere vorteilhafte Möglichkeit, den störenden Einfluß der Doppelbrechung zu reduzieren, besteht darin, ein optisches Element des Projektionsobjektivs mit einer Kompensations-Beschichtung zu belegen. Dabei geht man von der Erkenntnis aus, dass jede optische Beschichtung, beispielsweise Antireflex- oder Spiegelbeschichtungen, neben ihren Eigenschaften bezüglich Reflexion und Transmission auch immer optische Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände mit sich bringen. Diese sind für s- und p-polarisiertes Licht unterschiedlich und hängen zudem vom Einfallswinkel des Strahls auf die Schicht ab. Man hat also eine einfallswinkelabhängige Doppelbrechung. Für ein Strahlbüschel, dessen Mittenstrahl mit Inzidenzwinkel  $0^\circ$  auf die Kompensations-Beschichtung trifft, sind die Doppelbrechungs-Werte und -Richtungen rotationssymmetrisch bezüglich des Mittenstrahls. Die Kompensations-Beschichtung ist nun so aufgebaut, daß sie bezüglich des Betrags der Doppelbrechung ein vorgegebenes Verhalten als Funktion des Öffnungswinkels der Strahlen eines Strahlbüschels zeigt.

[0039] Dabei bestimmt man zunächst die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für ein Strahlbüschel in der Bildebene des Projektionsobjektivs. Der Öffnungswinkel  $\theta_R$  eines Strahls wird dabei zwischen der Strahlrichtung und der optischen Achse in der Bildebene, der Azimutwinkel  $\alpha_R$  zwischen der in die Bildebene projizierten Strahlrichtung und einer festen Bezugsrichtung innerhalb der Bildebene bestimmt. Die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände beschreibt dabei alle Einflüsse durch intrinsische Doppelbrechung von Fluorid-Kristall-Linsen, Spannungsdoppelbrechung, Belegung der optischen Elemente mit Antireflex-Schichten von Linsen oder Spiegel-schichten.

[0040] Aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  wird die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung bestimmt, welche auf ein optisches Element mit einer Elementachse aufgebracht wird. Als optische Elemente werden beispielsweise refraktive oder diffraktive Linsen, Planplatten oder Spiegel eingesetzt. Die optischen Flächen des optischen Elements sind durch die optisch genutzten Bereiche, also in der Regel Vorder- und Rückfläche gegeben. Die Elementachse ist beispielsweise durch eine Symmetrieachse einer rotationssymmetrischen Linse gegeben. Weist die Linse keine Symmetrieachse auf, so kann die Elementachse durch die Mitte eines einfallenden Strahlbündels oder durch eine Gerade gegeben sein, bezüglich der die Strahlwinkel aller Lichtstrahlen innerhalb der Linse minimal sind. Die effektiven Doppelbrechungswerte hängen von Azimutwinkeln  $\alpha_R$ , welche auf eine zur Elementachse senkrecht stehende Bezugsrichtung bezogen sind, und von Öffnungswinkeln  $\theta_R$ , welche auch die Elementachse bezogen sind, ab.

[0041] Einem Wertepaar  $(\alpha_R, \theta_R)$  eines Strahls in der Bildebene entspricht dabei ein Wertepaar  $(\alpha_P, \theta_P)$  am optischen Element.

[0042] Die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung wird nun so bestimmt, dass die Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für das gesamte System inklusive Kompensations-Beschichtung wesentlich reduziert sind gegenüber der Verteilung ohne die Kompensations-Beschichtung.

[0043] Die effektive Doppelbrechungsverteilung läßt sich durch die Materialwahl, die Dickenverläufe und die Aufdampfwinkel für die einzelnen Schichten der Kompensations-Beschichtung beeinflussen. Das Schichtdesign und die Prozessparameter ergeben sich dabei durch Anwendung von Schichtdesign-Computer-Programmen, welche aus der ef-

effektiven Doppelbrechungsverteilung, der Vorgabe der Materialien und der Geometrie des optischen Elements die Dickenverläufe der einzelnen Schichten und die Prozessgrößen bestimmt.

[0044] Die Kompensations-Beschichtung kann dabei auch auf mehreren optischen Elementen angebracht werden. Dies erhöht die Freiheitsgrade bei der Bestimmung der Kompensations-Schichten, die neben der Kompensation auch eine hohe Transmission der Beschichtung gewährleisten sollten.

[0045] Typische Verteilungen der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weisen für den Öffnungswinkel  $\theta_R = 0^\circ$  geringe Wegunterschiede auf. Deshalb ist es günstig, wenn die doppelbrechende Wirkung der Kompensations-Beschichtung für den Öffnungswinkel  $\theta_F = 0^\circ$  nahezu verschwindet. Dies erreicht man, wenn man bei der Herstellung der Kompensations-Beschichtung keine hohen Aufdampfwinkel zum

Einsatz kommen. Vorteilhaft weist deshalb die optische Fläche des optischen Elements, auf das die Kompensations-Beschichtung aufgebracht wird, eine möglichst geringe Krümmung auf.

[0046] Durch das gegeneinander Verdrehen von Linsen mit (100)- oder (111)-Orientierung erhält man wie oben beschrieben näherungsweise eine rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  in der Bildebene, welche nur vom Öffnungswinkel  $\theta_R$  abhängt. Die optischen Wegunterschiede können mit der Kompensations-Beschichtung eines optischen Elements noch weiter reduziert werden, deren effektive Doppelbrechungsverteilung primär nur vom Öffnungswinkel  $\theta_F$  abhängt. Dies wird erreicht, indem die Schichtdicken der einzelnen Schichten der Kompensations-Beschichtung über das optische Element homogen sind und keine Dickenverläufe aufweisen.

[0047] Vorteilhaft lässt sich die Erfindung einsetzen, indem man das optische Element mit der Kompensationsbeschichtung als austauschbares Element.

[0048] Vorteilhaft wird dabei das der Bildebene am nächsten gelegene optische Element verwendet.

[0049] Das Verfahren sieht dabei vor, dass in einem ersten Schritt Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für ein Strahlbüschel in der Bildebene bestimmt wird. Dabei wird der Einfluss von allen optischen Elementen des Objektivs inklusive Beschichtungen berücksichtigt. Das optische Element, das in einem nachfolgenden Schritt mit der Kompensationsbeschichtung belegt wird, ist dabei ebenfalls im Strahlengang des Strahlbüschels.

[0050] In einem zweiten Schritt wird mit dem bereits beschriebenen Verfahren die effektive Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung und die daraus resultierenden Dickenverläufe der einzelnen Schichten und die Prozessparameter zur Herstellung der einzelnen Schichten bestimmt.

[0051] In einem dritten Schritt wird das optische Element aus dem Strahlengang entfernt und mit der Kompensations-Beschichtung belegt. Falls die optische Fläche des optischen Elements bereits belegt war, wird diese Schicht vor der erneuten Belegung entfernt.

[0052] In einem vierten Schritt wird das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung wieder an dem ursprünglichen Ort innerhalb des Objektivs angebracht.

[0053] Als Material für die Linsen wird in Projektionsobjektiven vorzugsweise Kalzium-Fluorid eingesetzt, da Kalzium-Fluorid bei gemeinsamem Einsatz mit Quarz bei einer Arbeitswellenlängen von 193 nm sich zur Farbkorrektur besonders eignet, beziehungsweise bei einer Arbeitswellenlänge von 157 nm eine ausreichende Transmission bereitstellt. Aber auch für die Fluorid-Kristalle Strontium-Fluorid oder Barium-Fluorid gelten die hier getroffenen Aussagen, da es sich um Kristalle vom gleichen kubischen Kristall-Typ handelt.

[0054] Der störende Einfluss der intrinsische Doppelbrechung macht sich besonders dann bemerkbar, wenn die Lichtstrahlen innerhalb der Linsen große Öffnungswinkel aufweisen. Dies ist für Projektionsobjektive der Fall, die eine bildseitige numerische Apertur aufweisen, die größer als 0,7, insbesondere größer 0,8 ist.

[0055] Die intrinsische Doppelbrechung nimmt mit abnehmender Arbeitswellenlänge deutlich zu. So ist die intrinsische Doppelbrechung bei einer Wellenlänge von 193 nm mehr als doppelt so groß, bei einer Wellenlänge von 157 nm mehr als fünfmal so groß wie bei einer Wellenlänge von 248 nm. Die Erfindung lässt sich deshalb besonders dann vorteilhaft einsetzen, wenn die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 200 nm, insbesondere kleiner 160 nm aufweisen.

[0056] Bei dem Objektiv kann es sich dabei um ein rein refraktives Projektionsobjektiv handeln, das aus einer Vielzahl von rotationssymmetrisch um die optische Achse angeordneten Linsen besteht, oder um ein Projektionsobjektiv vom kadioptrischen Objektivtyp.

[0057] Derartige Projektionsobjektive lassen sich vorteilhaft in Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen einsetzen, die ausgehend von der Lichtquelle ein Beleuchtungssystem, ein Masken-Positioniersystem, eine Struktur tragende Maske, ein Projektionsobjektiv, ein Objekt-Positionierungssystem und ein Licht empfindliches Substrat umfassen.

[0058] Mit dieser Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage lassen sich mikrostrukturierte Halbleiter-Bauelemente herstellen.

[0059] Die Erfindung stellt auch ein geeignetes Verfahren zur Herstellung von Objektiven bereit. Gemäß dem Verfahren werden Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall, deren Linsenachsen in eine Hauptkristallrichtung weisen, derart um die Linsenachsen verdreht angeordnet, daß die Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu einer Linsenanordnung, bei der die Linsenachsen der Fluoridkristall-Linsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und bei der die Linsen gleich orientiert angeordnet sind.

[0060] Das Verfahren sieht weiterhin vor, Gruppen mit (100)-Linsen und mit (111)-Linsen oder (110)-Linsen zu bilden und diese parallel einzusetzen. Das Verfahren wird dabei beispielsweise bei einem Projektionsobjektiv angewandt, das mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen in <100>-Orientierung und mindestens zwei Linsen in <111>-Orientierung umfasst. Von diesen Linsen ist dabei weiterhin die Lage der Bezugsrichtungen bekannt. Das Verfahren nutzt dabei die erfinderische Erkenntnis aus, daß sich durch Drehen der Fluorid-Kristall-Linsen um die optische Achse die Maximalwerte der Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  der optischen Wegunterschiede wesentlich reduzieren lassen. Durch geeignete Simulationsmethoden wird dabei ein von einem Objektpunkt ausgehendes Strahlenbüschel durch ein Projektionsobjektiv propagiert und auf Grund der bekannten optischen Eigenschaften der Fluorid-Kristall-Linsen die Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  in der Bildebene bestimmt. In einem Optimierungsschritt werden nun die Drehwinkel zwischen den Fluorid-Kristall-Linsen so lange geändert, bis die Doppelbrechung tolerierbare Werte aufweist. Der Optimierungsschritt kann dabei auch weitere

Randbedingungen wie beispielsweise die Kompensation von nicht rotationssymmetrischen Linsenfehlern durch Linsendrehen berücksichtigen. Durch diesen Optimierungsschritt kann der Maximalwert der Verteilung  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  um bis zu 30%, insbesondere bis zu 50% reduziert werden im Vergleich zu einem Projektionsobjektiv, bei dem die Fluorid-Kristall-Linsen gleich orientiert angeordnet sind. Das Optimierungsverfahren kann auch einen Zwischenschritt aufweisen, In diesem Zwischenschritt werden aus den Fluorid-Kristall-Linsen Gruppen mit Linsen, wobei die Linsen einer Gruppe für einen äußersten Aperturstrahl bei gleich orientierter Anordnung der Linsen einen ähnlichen optischen Wegunterschied zwischen zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen erzeugen. In dem nachfolgenden Optimierungsschritt werden dann die Linsen nur innerhalb der Gruppen gedreht, um die optischen Wegunterschiede zu reduzieren. So lassen sich zunächst die (100)-Linsen derart drehen, daß die durch die (100)-Linsen hervorgerufenen optischen Wegunterschiede reduziert werden, und dann die (111)-Linsen derart drehen, daß die durch die (111)-Linsen hervorgerufenen optischen Wegunterschiede reduziert werden. Die Verteilung der Fluorid-Kristall-Linsen auf Linsen mit (100)-Orientierung und (111)-Orientierung muß bei der Optimierung so erfolgen, daß sich die resultierende (100)-Verteilung  $\Delta OPL_{100}(\alpha_R, \theta_R)$  und die resultierende (111)-Verteilung  $\Delta OPL_{111}(\alpha_R, \theta_R)$  weitgehend kompensieren. Entsprechendes gilt auch für den parallelen Einsatz von (100)-Linsen und (110)-Linsen.

[0061] Die Erfindung betrifft auch ein Herstellungsverfahren für eine Linse, bei dem in einem ersten Schritt mehrere Platten aus Fluorid-Kristall optisch nahtlos zu einem Blank gefügt werden, und in einem zweiten Schritt die Linse aus dem Blank durch bekannte Herstellmethoden herausgearbeitet wird. Die Platten werden dabei wie zuvor für Linsen oder Linsenteile beschrieben, zueinander um die Flächennormalen verdreht angeordnet.

[0062] Platten, deren Flächennormalen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen, haben vorteilhafterweise die gleiche axiale Dicke.

[0063] Werden (100)-Platten mit (111)-Platten optisch nahtlos gefügt, so sollte das Verhältnis der Summe der Dicken der (111)-Platten zu der Summe der Dicken der (100)-Platten  $= 1.5 \pm 0.2$  betragen.

[0064] Werden (100)-Platten mit (110)-Platten optisch nahtlos gefügt, so sollte das Verhältnis der Summe der Dicken der (110)-Platten zu der Summe der Dicken der (100)-Platten  $= 4.0 \pm 0.4$  betragen.

[0065] Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnungen.

[0066] Fig. 1 zeigt einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block senkrecht zu den {100}-Kristallebenen zusammen mit einer Linse eines Projektionsobjektives in schematischer Darstellung;

[0067] Fig. 2A-C zeigen je eine planparallele (100)-, (111)- und (110)-Linse in einer schematischen dreidimensionalen Darstellung;

[0068] Fig. 3 zeigt ein Koordinatensystem zur Definition des Öffnungswinkels und des Azimutwinkels;

[0069] Fig. 4A-F zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (100)-Linsen in verschiedenen Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um  $45^\circ$  verdrehte (100)-Linsen;

[0070] Fig. 5A-F zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (111)-Linsen in verschiedenen Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um  $60^\circ$  verdrehte (111)-Linsen;

[0071] Fig. 6A-G zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (111)-Linsen in verschiedenen Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander um  $90^\circ$  verdrehte (110)-Linsen, beziehungsweise für vier gegeneinander um  $45^\circ$  verdrehte (110)-Linsen;

[0072] Fig. 7 zeigt den Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektives;

[0073] Fig. 8 zeigt den Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektives; und

[0074] Fig. 9 zeigt eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage in schematischer Darstellung.

[0075] Fig. 1 zeigt schematisch einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block 3. Der Schnitt ist so gewählt, daß die {100}-Kristallebenen 5 als einzelne Linien zu sehen sind, so daß die {100}-Kristallebenen 5 sich senkrecht zur Papierebene befinden. Der Fluorid-Kristall-Block 3 dient als Blank oder Ausgangsmaterial für die (100)-Linse 1. In diesem Beispiel ist die (100)-Linse 1 eine Bikonvex-Linse mit der Linsenachse EA, die zugleich Symmetrieachse der Linse ist. Die Linse 1 wird nun so aus dem Fluorid-Kristall-Block herausgearbeitet, daß die Linsenachse BA senkrecht auf den {100}-Kristallebenen steht.

[0076] In Fig. 2A wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 201 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse BA zeigt dabei in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die  $\langle 101 \rangle$ ,  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ ,  $\langle 10\bar{1} \rangle$  und  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch vier "Keulen" 203 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich in den  $\langle 101 \rangle$ ,  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ ,  $\langle 10\bar{1} \rangle$  und  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von  $45^\circ$  und einem Azimutwinkel von  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$  innerhalb der Linse. Für Azimutwinkel von  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  und  $315^\circ$  ergeben sich minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von  $0^\circ$  verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

[0077] In Fig. 2B wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 205 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 101 \rangle$  und  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch drei "Keulen" 207 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich jeweils in den  $\langle 011 \rangle$ ,  $\langle 101 \rangle$  und  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von  $35^\circ$  und einem Azimutwinkel von  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  und  $240^\circ$  innerhalb der Linse. Für Azimutwinkel von  $60^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $300^\circ$  ergeben sich jeweils minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von  $0^\circ$  verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

[0078] In Fig. 2C wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung weist. Dargestellt ist



eine kreisrunde planparallele Platte 209 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse RA zeigt dabei in  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung. Neben der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung sind auch die  $\langle 01\bar{1} \rangle$ , die  $\langle 10\bar{1} \rangle$ , die  $\langle 101 \rangle$  und die  $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch fünf "Keulen" 211 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich zum einen in Richtung der Linsenachse RA, und zum anderen jeweils in der  $\langle 01\bar{1} \rangle$ ,  $\langle 10\bar{1} \rangle$ ,  $\langle 101 \rangle$  und  $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtung, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von  $0^\circ$ , beziehungsweise mit einem Öffnungswinkel von  $60^\circ$  und den vier Azimutwinkeln, die sich durch Projektion der  $\langle 01\bar{1} \rangle$ ,  $\langle 10\bar{1} \rangle$ ,  $\langle 101 \rangle$  und  $\langle 011 \rangle$ -Kristallrichtungen in die  $\{110\}$ -Kristallebene ergeben. Derartig hohe Öffnungswinkel treten in Kristallmaterial jedoch nicht auf, da die maximalen Öffnungswinkel durch die Brechzahl des Kristalls auf kleiner  $45^\circ$  beschränkt sind.

[0079] Die Definition von Öffnungswinkel  $\theta$  und Azimutwinkel  $\alpha$  ist in Fig. 3 dargestellt. Für die (100)-Linse von Fig. 2 zeigt die z-Achse in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung, die x-Achse in die Richtung, die sich durch Projektion der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung in die  $\{100\}$ -Kristallebene ergibt. Die z-Achse ist dabei gleich der Linsenachse und die x-Achse gleich der Bezugsrichtung.

[0080] Aus der zitierten Internetpublikation ist bekannt, daß Messungen bei Strahlausbreitung in der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung einen Doppelbrechungswert von  $(6.5 \pm 0.4)$  nm/cm bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 156.1$  nm für Kalzium-Fluorid ergeben haben. Mit diesem Messwert als Normierungsgröße kann die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  einer Kalzium-Fluorid-Linse in Abhängigkeit der Kristallorientierung theoretisch abgeleitet werden. Dazu werden die aus der Kristalloptik bekannten Formalismen zur Berechnung der Indexellipsoide in Abhängigkeit der Strahlrichtung herangezogen. Die theoretischen Grundlagen sind beispielsweise im "Lexikon der Optik", Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin, 1999 unter dem Stichwort "Kristalloptik" zu finden.

[0081] Neuere Messungen der Anmelderin haben ergeben, daß bei Strahlausbreitung in der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung die intrinsische Doppelbrechung 11 nm/cm in Kalzium-Fluorid-Kristall bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 156.1$  nm beträgt. Die im folgenden für die Normierungsgröße  $\Delta n_{\max} = 6.5$  nm/cm getroffenen Aussagen können ohne Schwierigkeiten auf die Normierungsgröße  $\Delta n_{\max} = 11$  nm/cm umgerechnet werden.

[0082] In Fig. 4A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für eine (100)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5 nm/cm bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 45^\circ$  entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

[0083] In Fig. 4B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 45^\circ$  für eine (100)-Linse dargestellt. Die vierzählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

[0084] In Fig. 4C ist die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  für einzelne Strahlrichtungen im  $(\theta, \alpha)$ -Winkelraum für eine (100)-Linse dargestellt. Jede Linie repräsentiert Betrag und Richtung für eine durch den Öffnungswinkel  $\theta$  und den Azimutwinkel  $\alpha$  definierte Strahlrichtung. Die Länge der Linien ist proportional zum Betrag der Doppelbrechung, beziehungsweise der Differenz der Hauptachsenlängen der Schnittellipse, während die Richtung der Linien die Orientierung der längeren Hauptachse der Schnittellipse angibt. Die Schnittellipse erhält man, indem man das Indexellipsoid für den Strahl der Richtung  $(\theta, \alpha)$  mit einer Ebene schneidet, die senkrecht auf der Strahlrichtung steht und durch die Mitte des Indexellipsoids geht. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Vierzähligkeit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die Doppelbrechung ist bei den Azimutwinkeln  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$  maximal.

[0085] Fig. 4D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$ , die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (100)-Linsen gleicher Dicke um  $45^\circ$  gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  ist unabhängig vom Azimutwinkel  $\alpha$ . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen tangential. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der planparallelen (100)-Linsen multipliziert. Rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man n planparallele (100)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel  $\beta$  zwischen je zwei Linsen gilt:

$$\beta = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ,$$

wobei n die Anzahl der planparallelen (100)-Linsen angibt und m eine ganze Zahl ist. Im Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der maximale Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel  $\theta = 30^\circ$  um 30% reduziert werden. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

[0086] In Fig. 4E ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für die zwei benachbarten planparallelen (100)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 4D dargestellt. Der maximale Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  beträgt 4.2 nm/cm und ist somit um 35% zu dem Maximalwert von 6.5 nm/cm in Fig. 4A reduziert.

[0087] In Fig. 4F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  für die zwei benachbarten planparallelen (100)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 4D dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel  $\alpha$ .

[0088] In Fig. 5A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für eine (111)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5 nm/cm bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 35^\circ$  entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

[0089] In Fig. 5B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 35^\circ$  für eine (111)-Linse dargestellt. Die dreizählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

[0090] Fig. 5C zeigt die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  für einzelne Strahlrichtungen im  $(\theta, \alpha)$ -Winkelraum für eine (111)-Linse in der bereits mit Fig. 4C eingeführten Darstellung. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Dreizähligkeit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die Doppelbrechung ist bei den Azimutwinkeln  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  und  $240^\circ$  maximal. Im Gegensatz zu einer (100)-Linse dreht sich die Orientierung der Doppelbrechung um  $90^\circ$ , wenn ein Strahl anstatt mit einem Azimutwinkel von  $0^\circ$  mit einem Azimutwinkel von  $180^\circ$  durch eine Linse läuft. Somit kann beispielsweise durch zwei gleich orientierte (111)-Linsen die Doppelbrechung kompensiert werden, wenn die Strahlwinkel eines Strahlbüschels zwischen den beiden Linsen ihr Vorzeichen tauschen.

[0091] Fig. 5D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$ , die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke um  $60^\circ$  gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  ist unabhängig vom Azimutwinkel  $\alpha$ . Die längeren Hauptachsen der Schnitteilepsen verlaufen jedoch im Gegensatz zu Fig. 4C radial. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der (111)-Linsen multipliziert. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man  $n$  planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel zwischen je zwei Linsen gilt:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{k} + 1 \cdot 120^\circ \pm 5^\circ$$

wobei  $k$  die Anzahl der planparallelen (111)-Linsen angibt und 1 eine ganze Zahl ist. Im Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel  $\theta = 30^\circ$  um 68% reduziert werden. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

[0092] In Fig. 5E ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für die zwei benachbarten planparallelen (111)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 5D dargestellt. Der maximale Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  beträgt  $2.8 \text{ nm/cm}$  und ist somit um 57% zu dem Maximalwert von  $6.5 \text{ nm/cm}$  in Fig. 5A reduziert.

[0093] In Fig. 5F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  für die zwei benachbarten planparallelen (111)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 5D dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel  $\alpha$ .

[0094] Kombiniert man nun innerhalb eines Projektionsobjektives Gruppen mit (100)-Linsen und Gruppen mit (111)-Linsen, so kann die von diesen Linsen eingebrachten optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weitgehend kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, daß zunächst innerhalb dieser Gruppen durch Drehung der Linsen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielt wird und sich dann durch Kombination einer Gruppe mit (100)-Linsen und einer Gruppe mit (111)-Linsen die beiden Verteilungen der optischen Wegunterschiede kompensieren. Dazu nutzt man aus, daß die Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnitteilepsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (100)-Linsen senkrecht auf den Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnitteilepsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (111)-Linsen steht, wie dies den Fig. 4D und 5D zu entnehmen ist. Entscheidend ist dabei, daß zum einen von den einzelnen Gruppen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzeugt wird und zum anderen die Summe der Beiträge der Gruppen mit (100)-Linsen dem Betrage nach nahezu gleich groß ist zur Summe der Beiträge der Gruppen mit (111)-Linsen.

[0095] In Fig. 6A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für eine (110)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von  $6.5 \text{ nm/cm}$  bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 0^\circ$  entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristalloptik bekannten Formeln bestimmt.

[0096] In Fig. 6B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 35^\circ$  für eine (110)-Linse dargestellt. Die zweizählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

[0097] Fig. 6C zeigt die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  für einzelne Strahlrichtungen im  $(\theta, \alpha)$ -Winkelraum für eine (110)-Linse in der bereits mit Fig. 4C eingeführten Darstellung. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Zweizähligkeit der Verteilung. Die Linie mit maximaler Länge und damit die maximale Doppelbrechung ergibt sich für den Öffnungswinkel  $\theta = 0^\circ$ .

[0098] Fig. 6D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$ , die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (110)-Linsen gleicher Dicke um  $90^\circ$  gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  weist nun eine vierzählige Azimutalsymmetrie auf. Maximale Doppelbrechungswerte treten bei den Azimutwinkeln  $\alpha = 45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  und  $315^\circ$  auf, wobei der Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel  $\theta = 40^\circ$   $2.6 \text{ nm/cm}$  beträgt.

[0099] Fig. 6E zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$ , die sich ergibt, wenn die zwei planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 6C mit zwei weiteren planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke kombiniert werden. Der Drehwinkel zwischen je zwei der (110)-Linsen beträgt  $45^\circ$ . Die resultierende Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\theta, \alpha)$  ist unabhängig vom Azimutwinkel  $\alpha$ . Die längeren Hauptachsen der Schnitteilepsen verlaufen jedoch im Gegensatz zu Fig. 4C radial, also ähnlich der Verteilung von Fig. 5C. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der (110)-Linsen multipliziert. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen er-

hält man, wenn man  $4 \cdot n$  planparallele (110)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel  $\beta$  zwischen je zwei Linsen gilt:

$$\beta = \frac{45^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ,$$

wobei  $4 \cdot n$  die Anzahl der planparallelen (100)-Linsen angibt und  $m$  eine ganze Zahl ist. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

[0100] In Fig. 6F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels  $\theta$  für den Azimutwinkel  $\alpha = 0^\circ$  für die vier benachbarten planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 6E dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  beträgt 1.0 nm/cm und ist somit um 84% zu dem Maximalwert von 6.5 nm/cm in Fig. 5A reduziert.

[0101] In Fig. 6G ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels  $\alpha$  für den Öffnungswinkels  $\theta = 41^\circ$  für die vier benachbarten planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Fig. 6E dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel  $\alpha$ .

[0102] Kombiniert man nun innerhalb eines Projektionsobjektivs Gruppen mit (110)-Linsen und Gruppen mit (100)-Linsen, so kann die von diesen Linsen eingebrachten optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weitgehend kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, daß zunächst innerhalb dieser Gruppen durch Drehung der Linsen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielt wird und sich dann durch Kombination einer Gruppe mit (110)-Linsen und einer Gruppe mit (100)-Linsen die beiden Verteilungen der optischen Wegunterschiede kompensieren. Dazu nutzt man aus, daß die Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnitellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (110)-Linsen senkrecht auf den Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnitellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (100)-Linsen steht, wie dies den Fig. 4D und 6E zu entnehmen ist. Entscheidend ist dabei, daß zum einen von den einzelnen Gruppen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzeugt wird und zum anderen die Summe der Beiträge der Gruppen mit (110)-Linsen dem Betrage nach nahezu gleich groß ist zur Summe der Beiträge der Gruppen mit (100)-Linsen.

[0103] In Fig. 7 ist der Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektivs 611 für die Wellenlänge 157 nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 der Anmelderin entnommen und entspricht dort Fig. 7 beziehungsweise Tabelle 6. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 verwiesen. Alle Linsen dieses Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0.9. Die Abbildungsleistung dieses Objektivs ist so gut korrigiert, daß die Abweichung von der Wellenfront einer idealen Kugelwelle kleiner 1.8 mλ bezogen auf die Wellenlänge von 157 nm ist. Gerade bei diesen Hochleistungsobjektiven ist es erforderlich, daß störende Einflüsse wie die der intrinsischen Doppelbrechung so weit wie möglich reduziert werden.

[0104] Für das Ausführungsbeispiel der Fig. 6 wurden die Öffnungswinkel  $\theta$  und Strahlwege  $RL_L$  des äußersten Aperturstrahls 609 für die einzelnen Linsen L601 bis L630 berechnet. Der äußerste Aperturstrahl 609 geht dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten  $x = 0$  mm und  $y = 0$  mm aus und weist in der Bildebene einen Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welcher der bildseitigen numerischen Apertur entspricht. Der äußerste Aperturstrahl 609 wird deshalb herangezogen, da sich für ihn nahezu die maximalen Öffnungswinkel innerhalb der Linsen ergeben.

Tabelle 2

Linse	Öffnungswinkel $\theta$ [°]	Strahlweg $RL_L$ [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
L601	8.1	15.1	2.9	-2.2	-0.8	-0.4	-9.0	-9.0	-9.1	-9.0
L602	8.7	8.2	1.7	-1.2	-0.5	-0.2	-4.9	-4.8	-4.9	-4.8
L603	7.8	9.5	1.7	-1.3	-0.4	-0.2	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7
L604	10.7	7.2	1.9	-1.3	-0.6	-0.3	-4.1	-4.1	-4.1	-4.1
L605	9.4	6.5	1.5	-1.0	-0.4	-0.2	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8
L606	10.3	8.5	2.1	-1.4	-0.7	-0.3	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8
L607	21.8	12.7	6.6	-2.7	-3.9	-1.8	-4.2	-4.2	-4.3	-4.2
L608	25.4	22.2	12.8	-4.4	-8.7	-3.9	-5.3	-5.7	-5.8	-5.7
L609	16.3	36.1	14.3	-7.6	-6.8	-3.3	-16.5	-16.5	-16.7	-16.5
L610	12.2	15.2	4.5	-2.9	-1.7	-0.8	-8.2	-8.2	-8.2	-8.2
L611	2.3	26.6	1.4	-1.3	-0.1	-0.1	-17.2	-17.2	-17.2	-17.2
L612	2.3	32.2	1.6	-1.5	-0.1	-0.1	-20.8	-20.8	-20.8	-20.8
L613	-18.3	30.4	-6.6	13.5	-7.0	-3.3	-12.5	-12.6	-12.7	-12.6
L614	-18.7	22.0	-4.8	10.0	-5.3	-2.5	-8.9	-8.9	-9.0	-8.9
L615	-14.0	10.2	-2.0	3.5	-1.5	-0.7	-5.1	-5.1	-5.2	-5.1
L616	-1.3	29.8	-0.8	0.9	0.0	0.0	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
L617	26.4	31.6	18.6	-6.1	-13.0	-5.7	-6.7	-7.6	-7.5	-7.6
L618	33.5	14.3	9.3	-2.0	-7.9	-3.1	-0.6	3.2	-1.4	3.2
L619	26.5	7.5	4.4	-1.4	-3.1	-1.4	-1.6	-1.8	-1.8	-1.8
L620	19.3	6.4	3.0	-1.4	-1.6	-0.8	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
L621	6.7	8.0	1.3	-1.0	-0.3	-0.1	-4.9	-4.9	-4.9	-4.9
L622	-10.3	7.7	-1.3	1.9	-0.6	-0.3	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4
L623	-11.9	9.6	-1.8	2.8	-1.0	-0.5	-5.2	-5.2	-5.2	-5.2
L624	0.3	17.8	0.1	-0.1	0.0	0.0	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
L625	6.0	16.3	2.3	-1.8	-0.5	-0.2	-9.9	-9.9	-10.0	-9.9
L626	-24.0	9.0	-1.9	5.0	-3.2	-1.5	-2.5	-2.6	-2.6	-2.6
L627	-35.6	8.0	-0.9	5.2	-4.7	-1.7	0.1	2.1	-0.5	2.1
L628	-39.4	12.0	-1.0	7.6	-7.5	-2.5	1.0	4.0	-0.3	4.0
L629	-35.3	27.3	-3.3	17.7	-15.7	-5.9	0.5	6.9	-1.9	6.9
L630	-35.3	26.0	-3.1	16.9	-15.0	-5.6	0.4	6.5	-1.9	6.5
Summe			64,5	42,3	112,9	47,4	-198,2	-178,7	-208,0	-178,8

[0105] Neben den Öffnungswinkeln  $A$  und den Weglängen  $RL_L$  für den äußersten Aperturstrahl sind in Tabelle 2 die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für verschiedene Linsenorientierungen zusammengestellt. Die optischen Wegunterschiede sind für (111)-Linsen, (100)-Linsen und (110)-Linsen zusammengestellt, wobei der Azimutwinkel  $\alpha_L$  des äußersten Randstrahl innerhalb der Linsen für eine (111)-Linse  $0^\circ$  und  $60^\circ$ , für eine (100)-Linse  $0^\circ$  und  $45^\circ$  und für eine (110)-Linse  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $135^\circ$  beträgt.

[0106] Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß die Öffnungswinkel  $\theta$  für die Linsen L608, L617, L618, L619, L627, L628, L629 und L630 größer als  $25^\circ$ , für die Linsen L618, L627, L628, L629 und L630 sogar größer als  $30^\circ$  sind. Besonders betroffen von hohen Öffnungswinkeln sind die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L627 bis L630.

[0107] Durch das Design des Projektionsobjektives wurde erreicht, daß der maximale Öffnungswinkel aller Lichtstrahlen kleiner  $45^\circ$  ist. Der maximale Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt  $39,4^\circ$  bei der Linse L628. Hilfreich war der Einsatz von zwei dicken Planlinsen L629 und L630 unmittelbar vor der Bildebene.

[0108] Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L621 und L622 befindet, beträgt 270 mm. Der Durchmesser der Linse L618 beträgt 207 mm und die Durchmesser der Linsen L627 bis L630 sind alle kleiner 190 mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 80% des Blendendurchmessers.

[0109] Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß es für einzelne Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte insgesamt niedriger sind. Dies liegt daran, daß bei (100)-Linsen

der Einfluß der  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtungen erst bei größeren Winkeln zu spüren ist wie bei (111)-Linsen. Beispielsweise bei den Linsen L608, L609 und L617 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 30% niedriger.

[0110] Anhand der beiden planparallelen Linsen L629 und L630 läßt sich gut zeigen, wie durch gegenseitige Drehung der Linsen die Doppelbrechung deutlich reduziert werden kann. Beide Linsen weisen gleiche Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl von  $35,3^\circ$  und ähnliche Strahlwege von 27,3 mm, beziehungsweise 26,0 mm auf. Würden beide Linsen als (100)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein optischer Wegunterschied von 30,7 nm ergeben. Verdreht man die beiden (100)-Linsen jedoch gegenseitig um  $45^\circ$ , so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 20,9 nm, also um 32%. Würden beide Linsen als (111)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein optischer Wegunterschied von 34,6 nm ergeben. Verdreht man die beiden (111)-Linsen jedoch gegenseitig um  $60^\circ$ , so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 13,6 nm, also um 61%.

[0111] Eine nahezu vollständige Kompensation der optischen Wegdifferenzen für zwei aufeinander orthogonale lineare Polarisationszustände auf Grund der intrinsischen Doppelbrechung, die durch die Linsen L629 und L630 hervorgerufen wird, kann erreicht werden, wenn die Linse L629 in die Linsen L6291 und L6292 und die Linse L630 in die Linsen L6301 und L6302 aufgespalten wird, wobei die Linse L6291 eine (100)-Linse der Dicke 9,15 mm, die Linse L6292 eine (111)-Linse der Dicke 13,11 mm, die Linse L6301 eine (100)-Linse der Dicke 8,33 mm und die Linse L6302 eine (111)-Linse der Dicke 12,9 mm ist. Die Linse L6291 und L6301 werden gegeneinander um  $45^\circ$ , die Linsen L6292 und L6302 um  $60^\circ$  gedreht. Der resultierende maximale optische Wegunterschied beträgt in diesem Fall dann 0,2 nm. Die Linsen L6291 und L6292, ebenso wie die Linsen L6301 und L6302 können optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden. Dieses Prinzip ist auch anwendbar, wenn das Projektionsobjektiv nur eine Kristall-Linse enthält. Diese wird dann mindestens in zwei Linsen zerlegt, die zueinander gedreht angeordnet werden. Das Zusammenfügen ist durch Ansprengen möglich. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zunächst einzelne Platten der gewünschten Kristallorientierung optisch nahtlos zu verbinden und in einem weiteren Verfahrensschritt die Linse aus den aneinandergefügten Platten zu fertigen.

[0112] Eine weitere Möglichkeit, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung durch die Linsen L629 und L630 zu reduzieren, besteht darin, die Linse L629 in die Linsen L6293 und L6294 sowie die Linse L630 in die Linsen L6303 und L6304 aufgespalten werden, wobei die Linse L6293 dann eine (110)-Linse der Dicke 11,13 mm, die Linse L6294 eine (110)-Linse der Dicke 11,13 mm, die Linse L6303 eine (110)-Linse der Dicke 10,62 mm und die Linse L6304 eine (110)-Linse der Dicke 10,62 mm ist. Die Linsen L6293 und L6294, sowie die Linsen L6303 und L6304 werden jeweils gegeneinander um  $90^\circ$  gedreht, wobei der Drehwinkel zwischen der Linse L6293 und L6303  $45^\circ$  beträgt. Der resultierende maximale optische Wegunterschied beträgt in diesem Fall 4,2 nm. Die Linsen L6293 und L6294, ebenso wie die Linsen L6303 und L6304 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.

[0113] Nahezu vollständig gelingt eine Kompensation der optischen Wegdifferenzen für zwei aufeinander orthogonale lineare Polarisationszustände, welche durch die hoch belasteten Linsen L629 und L630 hervorgerufen wird, wenn jede Linse in drei Linsenteile L6295, L6296 und L6297 bzw. L6305, L6306 und L6307 aufgespalten wird, wobei die Linse L6295 dann eine (100)-Linse der Dicke 4,45 mm, die Linsen L6296 und L6297 (110)-Linsen der Dicke 8,90 mm, die Linse L6305 eine (100)-Linse der Dicke 4,25 mm und die Linsen L6306 und L6307 (110)-Linsen der Dicke 8,49 mm sind. Die Linsen L6294 und L6304 werden gegeneinander um  $45^\circ$ , je zwei der Linsen L6295, L6297, L6306 und L6307 um  $45^\circ$  gedreht. In dieser Kombination verringert sich der resultierende maximale optische Wegunterschied auf unter 0,1 nm. Die Linsen L6295 bis L6297, ebenso wie die Linsen L6305 bis L6307 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.

[0114] Eine weitere Möglichkeit, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung durch die Linsen L629 und L630 zu reduzieren, besteht darin, zwei (110)-Linsen mit einer (100)-Linse zu kombinieren. Die beiden (110)-Linsen sind dabei um  $90^\circ$  gegeneinander verdreht einzubauen, während der Drehwinkel zwischen der (100)-Linse und den (110)-Linsen  $45^\circ + m \cdot 90^\circ$  beträgt, wobei  $m$  eine ganze Zahl ist. Dazu werden die Linse L629 in die Linsen L6298 und L6299 sowie die Linse L630 in die Linsen L6308 und L6309 aufgespalten, wobei die Linse L6298 dann eine (110)-Linse der Dicke 17,40 mm, die Linse L6299 eine (110)-Linse der Dicke 4,87 mm, die Linse L6308 eine (110)-Linse der Dicke 12,53 mm und die Linse L6309 eine (100)-Linse der Dicke 8,70 mm ist. Der resultierende maximale optische Wegunterschied liegt bei 3,1 nm. Die Linsen L6298 und L6299, ebenso wie die Linsen L6308 und L6309 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.

[0115] In Fig. 8 ist der Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs 711 für die Wellenlänge 157 nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 der Anmelderin entnommen und entspricht dort Fig. 9 beziehungsweise Tabelle 8. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP 00/13148 verwiesen. Alle Linsen dieses Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0,8.

[0116] Für das Ausführungsbeispiel der Fig. 8 wurden die Öffnungswinkel  $\theta$  und Strahlwege  $RL_L$  des oberen äußersten Aperturstrahls 713 und des unteren äußersten Aperturstrahls 715 für die einzelnen Linsen L801 bis L817 berechnet. Die äußersten Aperturstrahlen 713 und 715 gehen dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten  $x = 0$  mm und  $y = -82,15$  mm aus und weisen in der Bildebene Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welche der bildseitigen numerischen Apertur entsprechen. Der obere und der untere äußerste Aperturstrahl wurden berechnet, da es sich um ein achsfermes Objektfeld handelt und somit die Aperturstrahlen nicht symmetrisch zur optischen Achse verlaufen, wie dies für den äußersten Aperturstrahl des Ausführungsbeispiels der Fig. 7 der Fall war.

[0117] In Tabelle 4 sind die Daten für den oberen äußersten Aperturstrahl und in Tabelle 5 für den unteren äußersten Aperturstrahl zusammengestellt. Neben den Öffnungswinkeln  $\theta$  und den Weglängen  $RL_L$  für den äußersten Aperturstrahl sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für verschiedene Linsenorientierungen zusammengestellt; und zwar für (111)-Linsen, (100)-Linsen und (110)-Linsen, wobei der Azimutwinkel  $\alpha_L$  des äußersten Randstrahl innerhalb der Linsen für eine (111)-Linse  $0^\circ$  und  $60^\circ$ , für

# DE 102 10 782 A 1

eine (100)-Linse 0° und 45° und für eine (110)-Linse 0°, 45°, 90° und 135° beträgt.

Tabelle 4

Linse	Öffnungs-winkel $\theta$ [°]	Strahlweg $RL_L$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
801	1.4	28.1	0.8	-0.8	0.0	0.0	-18.2	-18.2	-18.2	-18.2
802	-10.8	30.7	-5.3	8.0	-2.7	-1.3	-17.2	-17.2	-17.3	-17.2
803	-15.6	32.4	-6.8	12.4	-5.7	-2.7	-15.3	-15.3	-15.4	-15.3
803	-24.4	31.8	-6.5	17.8	-11.7	-5.2	-8.4	-8.8	-9.0	-8.8
802	-19.5	26.6	-5.8	12.4	-6.8	-3.2	-10.2	-10.3	-10.4	-10.3
804	6.4	20.1	3.0	-2.4	-0.6	-0.3	-12.4	-12.4	-12.4	-12.4
805	10.8	34.4	9.0	-6.0	-3.0	-1.5	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
806	0.2	10.0	0.1	-0.1	0.0	0.0	-6.5	-6.5	-6.5	-6.5
807	-11.1	22.0	-3.9	5.9	-2.1	-1.0	-12.2	-12.2	-12.3	-12.2
808	0.1	18.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0
809	-0.8	9.0	-0.1	0.2	0.0	0.0	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
810	1.1	12.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0
811	-16.8	9.4	-2.0	3.8	-1.9	-0.9	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2
812	-10.4	29.8	-5.0	7.5	-2.4	-1.2	-16.9	-16.9	-16.9	-16.9
813	-8.8	34.7	-5.2	7.3	-2.1	-1.0	-20.5	-20.5	-20.5	-20.5
814	-9.4	17.5	-2.8	4.0	-1.2	-0.6	-10.2	-10.2	-10.2	-10.2
815	-27.4	28.1	-5.3	16.9	-12.2	-5.3	-5.2	-6.4	-6.1	-6.4
816	-28.7	40.2	-7.1	24.8	-18.6	-7.9	-6.2	-8.5	-7.6	-8.5
817	-30.8	39.0	-6.3	24.7	-19.6	-8.1	-3.9	-8.0	-5.7	-8.0
Summe			-48.9	136.1	-90.9	-40.3	-212.9	-220.9	-218.0	-220.9

Tabelle 5

Linse	Öffnungswinkel $\theta$ [°]	Strahlweg $RL_L$ [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
801	-11.6	32.1	-5.8	9.0	-3.2	-1.6	-17.6	-17.6	-17.6	-17.6
802	19.5	28.3	13.3	-6.1	-7.3	-3.4	-10.9	-10.9	-11.1	-10.9
803	24.7	33.8	19.1	-6.9	-12.7	-5.7	-8.6	-9.2	-9.3	-9.2
803	17.7	34.3	14.7	-7.4	-7.5	-3.6	-14.6	-14.6	-14.8	-14.6
802	12.7	31.6	9.7	-6.0	-3.8	-1.8	-16.7	-16.7	-16.8	-16.7
804	-5.2	27.7	-2.7	3.3	-0.6	-0.3	-17.4	-17.4	-17.4	-17.4
805	-4.5	34.6	-3.0	3.5	-0.5	-0.3	-21.9	-21.9	-21.9	-21.9
806	-8.6	19.5	-2.9	4.0	-1.1	-0.6	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
807	-0.5	16.5	-0.2	0.2	0.0	0.0	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7
808	-8.2	25.6	-3.7	5.0	-1.3	-0.7	-15.3	-15.3	-15.3	-15.3
809	-7.5	10.1	-1.3	1.8	-0.4	-0.2	-6.1	-6.1	-6.1	-6.1
810	-9.1	13.1	-2.0	2.9	-0.8	-0.4	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7
811	9.0	9.9	2.1	-1.5	-0.6	-0.3	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
812	2.6	30.7	1.8	-1.6	-0.2	-0.1	-19.8	-19.8	-19.8	-19.8
813	0.9	34.0	0.6	-0.6	0.0	0.0	-22.1	-22.1	-22.1	-22.1
814	1.3	10.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-6.7	-6.7	-6.7	-6.7
815	23.5	16.3	8.9	-3.4	-5.7	-2.6	-4.7	-4.8	-4.9	-4.8
816	24.6	37.2	21.0	-7.6	-13.9	-6.2	-9.6	-10.2	-10.3	-10.2
817	29.4	29.6	18.5	-5.1	-14.1	-5.9	-4.0	-6.2	-5.2	-6.2
Summe			88.3	-16.8	-73.7	-33.5	-231.9	-235.4	-235.2	-235.4

[0118] Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß die Öffnungswinkel  $\theta$  für die Linsen L815 bis L817 größer als  $25^\circ$  sind. Auch in diesem Ausführungsbeispiel weisen die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L815 bis L817 große Öffnungswinkel auf. Durch das Design der Linsen L815 bis L817 wurde erreicht, daß der maximale Öffnungswinkel kleiner gleich

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right) = \arcsin\left(\frac{0.8}{1.5597}\right) = 30.9^\circ$$

ist. Der maximale Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt  $30.8^\circ$  für die Linse L817.

[0119] Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L811 und L812 befindet, beträgt 193 mm. Die Durchmesser der Linsen L815 bis L817 sind alle kleiner als 162 mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 85% des Blendendurchmessers.

[0120] Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß es für Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte insgesamt niedriger sind. Beispielsweise bei den Linsen L815 bis L817 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 20% niedriger.

[0121] Anhand des Ausführungsbeispiels der Fig. 8 soll im folgenden gezeigt werden, wie durch den parallelen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen die intrinsische Doppelbrechung weitgehend kompensiert werden kann.

[0122] Zunächst werden alle Kalzium-Fluorid in (111)-Orientierung ohne gegenseitiges Verdrehen der (111)-Linsen eingebaut. In diesem Fall ergibt sich ein maximaler optischer Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 136 nm. Durch Drehen der (111)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 38 nm reduziert werden. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen jeweils  $60^\circ$  beträgt. Zu je einer Dreier-Gruppe werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen  $40^\circ$  beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammengefaßt mit einem gegenseitigen Drehwinkel von  $30^\circ$ .

[0123] Werden alle Kalzium-Fluorid in (100)-Orientierung ohne gegenseitiges Verdrehen der (100)-Linsen eingebaut, so ergibt sich ein maximaler optischer Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände

von 90.6 nm. Durch Drehen der (100)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 40 nm reduziert werden. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen jeweils  $45^\circ$  beträgt. Zu je einer Dreier-Gruppe werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen  $30^\circ$  beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammengefaßt mit einem gegenseitigen Drehwinkel von  $22.5^\circ$ .

[0124] Eine maximalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 7 nm erhält man, wenn man nun Gruppen mit (100)-Linsen mit Gruppen mit (111)-Linsen kombiniert. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe von (111)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen  $60^\circ$  beträgt. Die Linsen L802 und L803 werden zu einer Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen  $45^\circ$  beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (100)-Linsen werden die Linsen L808, L809 und L810 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen  $30^\circ$  beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (111)-Linsen werden die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen  $40^\circ$  beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt mit einem Drehwinkel von  $22.5^\circ$ . Die Linsenachsen der nicht zu einer Gruppe zusammengefaßten Linsen L805 und L807 sind in  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung orientiert, während die Linsenachse der Linse L806 in  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung orientiert ist. Die Gruppen können gegenseitig beliebig um die optische Achse verdreht angeordnet sein. Diese Drehfreiheitsgrade lassen sich zur Kompensation nicht rotationssymmetrischer Aberrationen ausnützen, die beispielsweise durch die Fassung der Linsen erzeugt werden.

[0125] Anhand des refraktiven Objektivs 611 soll im folgenden gezeigt werden, wie durch Belegung eines optischen Elements mit einer Kompensations-Beschichtung 613 der störende Einfluß von Doppelbrechungseffekten deutlich reduziert werden kann. Es sollen hierzu nur die Doppelbrechungs-Beiträge der beiden Linsen L629 und L630 betrachtet werden, die aus Kalzium-Fluorid bestehen und damit intrinsische Doppelbrechung zeigen. Die beiden Linsen haben in diesem Ausführungsbeispiel eine (111)-Orientierung und sind um  $60^\circ$  gegeneinander verdreht. Damit erreicht man eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$ . Für einen äußersten Aperturstrahl beträgt der maximale optische Wegunterschied  $\Delta OPL$  zwischen 13.6 nm und 14.6 nm, je nach Azimutwinkel  $\alpha_R$ . Nun wird auf der der Bildebene O zugewandten optischen Fläche der Linse L630 die in Tabelle 6 beschriebene Kompensations-Beschichtung 613 aufgebracht. Die Kompensations-Beschichtung 613 besteht aus 15 einzelnen Schichten aus den Materialien Magnesium-Fluorid ( $MgF_2$ ) und Lanthan-Fluorid ( $LaF_3$ ), n und k in Tabelle 6 geben Real- und Imaginärteil des Brechungsindex an. Die Schichtdicken sind homogen und weisen keinen lateralen Dickenverlauf auf. Die Aufdampfwinkel während der Beschichtung stehen senkrecht zur optischen Fläche der Linse L630. Mit der Kompensations-Beschichtung beträgt der resultierende optische Wegunterschied 1.1 nm und ist somit deutlich reduziert im Vergleich zum Objektiv ohne Kompensations-Beschichtung.



Tabelle 6

Schicht	Dicke [nm]	Material
	Substrat	CaF <sub>2</sub>
1	103.54	MgF <sub>2</sub>
2	41.54	LaF <sub>3</sub>
3	33.35	MgF <sub>2</sub>
4	30.8	LaF <sub>3</sub>
5	39.53	MgF <sub>2</sub>
6	35.34	LaF <sub>3</sub>
7	32.05	MgF <sub>2</sub>
8	27.25	LaF <sub>3</sub>
9	28.57	MgF <sub>2</sub>
10	26.48	LaF <sub>3</sub>
11	27.64	MgF <sub>2</sub>
12	26.17	LaF <sub>3</sub>
13	27.36	MgF <sub>2</sub>
14	26.11	LaF <sub>3</sub>
15	8.66	MgF <sub>2</sub>

Optische Konstanten	n	k
LaF <sub>3</sub>	1.760026	0.00118471
MgF <sub>2</sub>	1.506675	0.00305275

[0126] Eine analoge Vorgehensweise ist auch möglich, wenn statt der beiden letzten Linsen das gesamte Objektiv betrachtet wird. Anstatt die Doppelbrechung mit nur einem optischen Element mit einer Kompensations-Beschichtung zu kompensieren kann man auch mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegen.

[0127] Das Verfahren kann auch angewendet werden, um Doppelbrechung in einem Gesamtsystem zu kompensieren, wobei die Ursachen dieser Doppelbrechung Spannungsdoppelbrechung, intrinsische Doppelbrechung und Doppelbrechung durch die übrigen Schichten sein können.

[0128] Nach der Endjustage eines Systems wird die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  für ein oder mehrere Strahlenbüschel in der Bildebene bestimmt. Mittels eines Programms zur Optimierung von Schichten wird dann die notwendige Kompensationsschicht berechnet und zum Beispiel auf der der Bildebene am nächsten gelegenen Systemfläche aufgebracht. Es ist günstig, wenn das der Bildebene am nächsten gelegene optische Element austauschbar ist. So lassen sich auch Doppelbrechungs-Effekte, die erst mit dem Betrieb des Objektivs entstehen, korrigieren.

[0129] Um Doppelbrechung von Kristallen im UV zu kompensieren, kann man, wie oben beschrieben, Kristall-Elemente mit verschiedenen Orientierungen der Kristallachsen hintereinander anordnen. Wenn man in einem optischen System Linsen mit verschiedenen Kristallrichtungen hintereinander anordnet, hat man das Problem, daß vielfach Linsen mit verschiedenen Winkeln durchstrahlt werden, die Kompensation dann möglicherweise nur eingeschränkt möglich ist. Bei Optiken, die nur eine Kristalllinse enthalten, ist diese Art der Kompensation überhaupt nicht möglich.

[0130] Eine Lösungsmöglichkeit ist es, eine Linse konstruktiv in zwei aufzuspalten, die verdreht gegeneinander anzusprengen sind. Praktisch leidet dieses Verfahren an Spannungen, die die Passe verformen und daran, daß die beiden Hälften lateral mit einer Genauigkeit von Mikrometern positioniert werden müssen.

[0131] Vorgeschlagen wird, Blanks aus aneinander angesprengten, hinsichtlich der Orientierung der Kristallachsen gegeneinander verdrehten Einzelplatten herzustellen, die dann zu einer Linse gefräst und poliert werden. Alles obengesagte über die Orientierung gilt auch hierfür. Außer dem klassischen Ansprengen (wringing) der Optik-Fertigung sind auch

alle anderen Füge-techniken mit innigem Kontakt und geringstmöglichem Spannungseintrag möglich und von der Erfindung umfaßt. Das Ansprengen kann insbesondere durch Schichten, z. B. aus Quarzglas, unterstützt werden. Wichtig ist, daß an der Füge-stelle keine Brechung oder Reflexion auftritt, die störend wäre.

[0132] Die Auswahl der Orientierungen erfolgt nach den oben beschriebenen Regeln.

[0133] Als Ausführungsbeispiele werden Blanks angegeben, aus denen sich beispielsweise die Linse L816 für das Projektionsobjektiv der Fig. 8 fertigen läßt. Die Linse L816 weist eine konvexe asphärische Vorderfläche mit dem Scheitelradius 342.13 mm und eine konkave sphärische Rückfläche mit dem Scheitelradius 449.26 mm auf. Die axiale Dicke beträgt 37.3 mm. Das Linienmaterial ist Kalzium-Fluorid. Der Linsendurchmesser beträgt 141 mm. Das Blank, aus dem die Linse herausgearbeitet werden soll, benötigt mindestens eine Gesamtdicke von 45 mm und einen Durchmesser von 150 mm. Das Blank kann dabei aus zwei gegeneinander um 45° gedrehten (100)-Platten der Dicke 9.0 mm und zwei gegeneinander um 60° gedrehten (111)-Platten der Dicke 13.5 mm bestehen, die optisch nahtlos gefügt sind. Die (100)-Platten und die (111)-Platten sollten dabei jeweils benachbart angeordnet sein.

[0134] In einer weiteren Ausführungsform werden sechs jeweils gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der Dicke 3.0 mm und sechs jeweils gegeneinander um 60° gedrehte (111)-Platten der Dicke 4.5 optisch nahtlos gefügt, wobei jeweils nach zwei (100)-Platten zwei (111)-Platten folgen.

[0135] In einer weiteren Ausführungsform werden vier jeweils gegeneinander um 45° gedrehte (110)-Platten der Dicke 9.0 mm und zwei gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der Dicke 4.5 optisch nahtlos gefügt, wobei die zwei (100)-Platten auf die vier (110)-Platten folgen.

[0136] In einer weiteren Ausführungsform werden acht jeweils gegeneinander um 45° gedrehte (110)-Platten der Dicke 4.5 mm und vier gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der Dicke 2.25 optisch nahtlos gefügt, wobei nach vier (110)-Platten jeweils zwei (100)-Platten folgen.

[0137] Anhand von Fig. 9 wird der prinzipielle Aufbau einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage beschrieben. Die Projektionsbelichtungsanlage 81 weist eine Beleuchtungseinrichtung 83 und Projektionsobjektiv 85 auf. Das Projektionsobjektiv 85 umfaßt eine Linsen-anordnung 89 mit einer Aperturblende AP, wobei durch die Linsen-anordnung 89 eine optische Achse 87 definiert wird. Ausführungsbeispiele für die Linsen-anordnung 89 sind in Fig. 6 und Fig. 7 gegeben. Zwischen der Beleuchtungseinrichtung 83 und dem Projektionsobjektiv 85 ist eine Maske 89 angeordnet, die mittels eines Maskenhalters 811 im Strahlengang gehalten wird. Solche in der Mikrolithographie verwendeten Masken 89 weisen eine Mikrometer-Nanometer Struktur auf, die mittels des Projektionsobjektives 85 beispielsweise um den Faktor 4 oder 5 verkleinert auf eine Bildebene 813 abgebildet wird. In der Bildebene 813 wird ein durch einen Substrathalter 817 positioniertes lichtempfindliches Substrat 815, beziehungsweise ein Wafer, gehalten.

[0138] Die noch auflösbaren minimalen Strukturen hängen von der Wellenlänge  $\lambda$  des für die Beleuchtung verwendeten Lichtes sowie von der bildseitigen numerischen Apertur des Projektionsobjektives 85 ab, wobei die maximal erreichbare Auflösung der Projektionsbelichtungsanlage 81 mit abnehmender Wellenlänge  $\lambda$  der Beleuchtungseinrichtung 83 und mit zunehmender bildseitiger numerischer Apertur des Projektionsobjektives 85 steigt. Mit den in Fig. 6 und Fig. 7 gezeigten Ausführungsbeispielen lassen sich Auflösungen kleiner 150 nm realisieren. Deshalb müssen auch Effekte wie die intrinsische Doppelbrechung minimiert werden. Durch die Erfindung ist es gelungen, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung gerade bei Projektionsobjektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen stark zu reduzieren.

## DE 102 10 782 A 1

TABELLE 1

M1587a

5	LINSEN	RADIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL BEI 157.629nm	1/2 FREIER DURCHMESSER
	0	0.000000000	27.171475840	N2	1.00031429	46.200
		0.000000000	0.602670797	N2	1.00031429	52.673
	L601	900.198243311AS	15.151284556	CaF2	1.55929035	53.454
10		-235.121108435	9.531971079	N2	1.00031429	54.049
	L602	-167.185917779	8.294716452	CaF2	1.55929035	54.178
		-132.673519510	14.020355779	N2	1.00031429	54.901
	L603	-333.194588652	9.893809820	CaF2	1.55929035	53.988
		-155.450516203	15.930502944	N2	1.00031429	54.132
	L604	-73.572316296	7.641977580	CaF2	1.55929035	53.748
15		-68.248613899AS	2.881720302	N2	1.00031429	55.167
	L605	-86.993585564AS	5.094651720	CaF2	1.55929035	52.580
		-238.150965327	5.379130780	N2	1.00031429	53.729
	L606	-165.613920870	5.094651720	CaF2	1.55929035	53.730
		153.417884485	34.150169591	N2	1.00031429	56.762
	L607	-92.061009990	5.094651720	CaF2	1.55929035	58.081
20		8491.086261873AS	19.673523795	N2	1.00031429	74.689
	L608	-407.131300451	30.380807138	CaF2	1.55929035	87.291
		-140.620317156	0.761662684	N2	1.00031429	91.858
	L609	-4831.804853654AS	50.269660218	CaF2	1.55929035	117.436
		-192.197373609	1.688916911	N2	1.00031429	121.408
25	L610	-367.718684892	21.227715500	CaF2	1.55929035	127.704
		-233.628547894	2.224071019	N2	1.00031429	129.305
	L611	709.585855080	28.736922725	CaF2	1.55929035	137.016
		1238.859445357	9.120684720	N2	1.00031429	137.428
	L612	1205.457051945	49.281218258	CaF2	1.55929035	138.288
		-285.321880705	1.625271224	N2	1.00031429	138.379
30	L613	137.549591710	56.718543740	CaF2	1.55929035	108.652
		-4380.301012978AS	0.623523902	N2	1.00031429	106.138
	L614	2663.880214408	6.792868960	CaF2	1.55929035	103.602
		149.184979730	15.779049257	N2	1.00031429	84.589
	L615	281.093108064	6.792868960	CaF2	1.55929035	83.373
35		184.030288413	32.341552355	N2	1.00031429	77.968
	L616	-222.157416308	5.094651720	CaF2	1.55929035	77.463
		101.254238115AS	56.792834221	N2	1.00031429	71.826
	L617	-106.980638018	5.094651720	CaF2	1.55929035	72.237
		1612.305471130	20.581065398	N2	1.00031429	89.760
	L618	-415.596135628	26.398111993	CaF2	1.55929035	96.803
40		-204.680044631	0.713343960	N2	1.00031429	103.409
	L619	-646.696622394	25.867340760	CaF2	1.55929035	116.636
		-231.917626896	0.766268682	N2	1.00031429	118.569
	L620	-790.657607677	23.400482872	CaF2	1.55929035	128.806
		-294.872053725	0.721402031	N2	1.00031429	130.074
45	L621	786.625567756	40.932308205	CaF2	1.55929035	141.705
		-431.247283013	12.736629300	N2	1.00031429	142.089
		0.000000000	-8.491086200	N2	1.00031429	134.586
	L622	295.022653593AS	20.185109438	CaF2	1.55929035	139.341
		449.912291916	0.619840486	N2	1.00031429	137.916
	L623	158.934076212	48.662890509	CaF2	1.55929035	136.936
50		-622.662988878	30.955714157	N2	1.00031429	135.288
	L624	-224.404889753	12.736629300	CaF2	1.55929035	134.760
		-251.154571510AS	16.079850229	N2	1.00031429	134.853
	L625	-193.582989843AS	16.510083506	CaF2	1.55929035	134.101
		-198.077570749	0.880353872	N2	1.00031429	136.109
55	L626	206.241795157	19.927993542	CaF2	1.55929035	101.240
		338.140581666	0.925956949	N2	1.00031429	97.594
	L627	111.017549581	24.580089962	CaF2	1.55929035	85.023
		169.576109839	0.777849447	N2	1.00031429	81.164
	L628	117.982165264	31.161065630	CaF2	1.55929035	75.464
		921.219058213AS	6.934980174	N2	1.00031429	69.501
60	L629	0.000000000	22.260797322	CaF2	1.55929035	63.637
		0.000000000	4.245543100	N2	1.00031429	48.606
	L630	0.000000000	21.227715500	CaF2	1.55929035	41.032

65

# DE 102 10 782 A 1

0.000000000 8.491086200 N2 1.00031429 26.698  
 0.000000000 0.000000000 1.00000000 11.550  
 Wellenlänge und Brechzahl sind gegenüber Vakuum angegeben.

5

## ASPHAERISCHE KONSTANTEN

### Asphäre der Linse L601

10

K 0.0000  
 C1 1.28594437e-007  
 C2 8.50731836e-013  
 C3 1.16375620e-016  
 C4 2.28674275e-019  
 C5 -1.23202729e-022  
 C6 3.32056239e-026  
 C7 -4.28323389e-030  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

15

20

### Asphäre der Linse L604

25

K -1.3312  
 C1 -4.03355456e-007  
 C2 2.25776586e-011  
 C3 -2.19259878e-014  
 C4 4.32573397e-018  
 C5 -7.92477159e-022  
 C6 7.57618874e-026  
 C7 -7.14962797e-030  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

30

35

### Asphäre der Linse L605

K -1.1417  
 C1 1.33637337e-007  
 C2 1.56787758e-011  
 C3 -1.64362484e-014  
 C4 3.59793786e-018  
 C5 -5.11312568e-022  
 C6 1.70636633e-026  
 C7 1.82384731e-030  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

40

45

50

### Asphäre der Linse L607

K 0.0000  
 C1 1.34745120e-007  
 C2 -2.19807543e-011  
 C3 1.20275881e-015  
 C4 4.39597377e-020  
 C5 -2.37132819e-023  
 C6 2.87510939e-027  
 C7 -1.42065162e-031  
 C8 0.00000000e+000

55

60

65

C9 0.00000000e+000  
Asphäre der Linse L609

5 K 0.0000  
C1 6.85760526e-009  
C2 -4.84524868e-013  
C3 -6.28751350e-018  
C4 -3.72607209e-022  
C5 3.25276841e-026  
10 C6 -4.05509974e-033  
C7 -3.98843079e-035  
C8 0.00000000e+000  
C9 0.00000000e+000

15  
Asphäre der Linse L613

K 0.0000  
C1 2.24737416e-008  
20 C2 -4.45043770e-013  
C3 -4.10272049e-017  
C4 4.31632628e-021  
C5 -3.27538237e-025  
C6 1.44053025e-029  
25 C7 -2.76858490e-034  
C8 0.00000000e+000  
C9 0.00000000e+000

30 Asphäre der Linse L616

K 0.0000  
C1 -2.83553693e-008  
C2 -1.12122261e-011  
35 C3 -2.05192812e-016  
C4 -1.55525080e-020  
C5 -4.77093112e-024  
C6 8.39331135e-028  
C7 -8.97313681e-032  
40 C8 0.00000000e+000  
C9 0.00000000e+000

Asphäre der Linse L622

45 K 0.0421  
C1 7.07310826e-010  
C2 -2.00157185e-014  
C3 -9.33825109e-020  
50 C4 1.27125854e-024  
C5 1.94008709e-027  
C6 -6.11989858e-032  
C7 2.92367322e-036  
C8 0.00000000e+000  
55 C9 0.00000000e+000

60

65

## Asphäre der Linse L624

K 0.0000  
 C1 3.02835805e-010  
 C2 -2.40484062e-014  
 C3 -3.22339189e-019  
 C4 1.64516979e-022  
 C5 -8.51268614e-027  
 C6 2.09276792e-031  
 C7 -4.74605669e-036  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

5

10

## Asphäre der Linse L625

K 0.0000  
 C1 -3.99248993e-010  
 C2 5.79276562e-014  
 C3 3.53241478e-018  
 C4 -4.57872308e-023  
 C5 -6.29695208e-027  
 C6 1.57844931e-031  
 C7 -2.19266130e-036  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

15

20

25

## Asphäre der Linse L628

K 0.0000  
 C1 4.40737732e-008  
 C2 1.52385268e-012  
 C3 -5.44510329e-016  
 C4 6.32549789e-020  
 C5 -4.58358203e-024  
 C6 1.92230388e-028  
 C7 -3.11311258e-033  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

30

35

40

45

50

55

60

65

## DE 102 10 782 A 1

TABELLE 3

L61						
5	LINSEN	RADIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL BEI 157.13 nm	1/2 FREIER DURCHMESSER
	0	0.000000000	34.000000000		1.000000000	82.150
		0.000000000	0.100000000		1.000000000	87.654
	L801	276.724757380	40.000000000	CaF2	1.55970990	90.112
		1413.944109416AS	95.000000000		1.000000000	89.442
10	SP1	0.000000000	11.000000000		1.000000000	90.034
		0.000000000	433.237005445		1.000000000	90.104
	L802	-195.924336384	17.295305525	CaF2	1.55970990	92.746
		-467.658808527	40.841112468		1.000000000	98.732
	L803	-241.385736441	15.977235467	CaF2	1.55970990	105.512
		-857.211727400AS	21.649331094		1.000000000	118.786
15	SP2	0.000000000	0.000010000		1.000000000	139.325
		253.074839896	21.649331094		1.000000000	119.350
	L803'	857.211727400AS	15.977235467	CaF2	1.55970990	118.986
		241.385736441	40.841112468		1.000000000	108.546
	L802'	467.658808527	17.295305525	CaF2	1.55970990	102.615
20		195.924336384	419.981357165		1.000000000	95.689
	SP3	0.000000000	6.255658280		1.000000000	76.370
		0.000000000	42.609155219		1.000000000	76.064
	Z1	0.000000000	67.449547115		1.000000000	73.981
	L804	432.544479547	37.784311058	CaF2	1.55970990	90.274
		-522.188532471	113.756133662		1.000000000	92.507
25	L805	-263.167605725	33.768525968	CaF2	1.55970990	100.053
		-291.940616829AS	14.536591424		1.000000000	106.516
	L806	589.642961222AS	20.449887046	CaF2	1.55970990	110.482
		-5539.698828792	443.944079795		1.000000000	110.523
	L807	221.780582003	9.000000000	CaF2	1.55970990	108.311
30		153.071443064	22.790060084		1.000000000	104.062
	L808	309.446967518	38.542735318	CaF2	1.55970990	104.062
		-2660.227900099	0.100022286		1.000000000	104.098
	L809	23655.354584194	12.899131182	CaF2	1.55970990	104.054
		-1473.189213176	9.318886362		1.000000000	103.931
	L810	-652.136459374	16.359499814	CaF2	1.55970990	103.644
35		-446.489459129	0.100000000		1.000000000	103.877
	L811	174.593507050	25.900313780	CaF2	1.55970990	99.267
		392.239615259AS	14.064505431		1.000000000	96.610
		0.000000000	2.045119392		1.000000000	96.552
	L812	7497.306838492	16.759051656	CaF2	1.55970990	96.383
40		318.210831711	8.891640764		1.000000000	94.998
	L813	428.724465129	41.295806263	CaF2	1.55970990	95.548
		3290.097860119AS	7.377912006		1.000000000	95.040
	L814	721.012739719	33.927118706	CaF2	1.55970990	95.443
		-272.650872353	6.871397517		1.000000000	95.207
	L815	131.257556743	38.826450065	CaF2	1.55970990	81.345
45		632.112566477AS	4.409527396		1.000000000	74.847
	L816	342.127616157AS	37.346293509	CaF2	1.55970990	70.394
		449.261078744	4.859754445		1.000000000	54.895
	L817	144.034814702	34.792179308	CaF2	1.55970990	48.040
		-751.263321098AS	11.999872684		1.000000000	33.475
50	0'	0.000000000	0.000127776		1.000000000	16.430

55

60

65

## ASPHAERISCHE KONSTANTEN

## Asphäre der Linse L801

K	0.0000	5
C1	4.90231706e-009	
C2	3.08634889e-014	
C3	-9.53005325e-019	
C4	-6.06316417e-024	10
C5	6.11462814e-028	
C6	-8.64346302e-032	
C7	0.00000000e+000	
C8	0.00000000e+000	
C9	0.00000000e+000	15

## Asphäre der Linse L803

K	0.0000	20
C1	-5.33460884e-009	
C2	9.73867225e-014	
C3	-3.28422058e-018	
C4	1.50550421e-022	
C5	0.00000000e+000	25
C6	0.00000000e+000	
C7	0.00000000e+000	
C8	0.00000000e+000	
C9	0.00000000e+000	30

## Asphäre der Linse L803`

K	0.0000	
C1	5.33460884e-009	35
C2	-9.73867225e-014	
C3	3.28422058e-018	
C4	-1.50550421e-022	
C5	0.00000000e+000	
C6	0.00000000e+000	40
C7	0.00000000e+000	
C8	0.00000000e+000	
C9	0.00000000e+000	

## Asphäre der Linse L805

K	0.0000	45
C1	2.42569449e-009	
C2	3.96137865e-014	
C3	-2.47855149e-018	50
C4	7.95092779e-023	
C5	0.00000000e+000	
C6	0.00000000e+000	
C7	0.00000000e+000	55
C8	0.00000000e+000	
C9	0.00000000e+000	

60

65



## Asphäre der Linse L806

K 0.0000  
 5 C1 -6.74111232e-009  
 C2 -2.57289693e-014  
 C3 -2.81309020e-018  
 C4 6.70057831e-023  
 C5 5.06272344e-028  
 10 C6 -4.81282974e-032  
 C7 0.00000000e+000  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

## 15 Asphäre der Linse L811

K 0.0000  
 C1 2.28889624e-008  
 20 C2 -1.88390559e-014  
 C3 2.86010656e-017  
 C4 -3.18575336e-021  
 C5 1.45886017e-025  
 C6 -1.08492931e-029  
 C7 0.00000000e+000  
 25 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L813

30 K 0.0000  
 C1 3.40212872e-008  
 C2 -1.08008877e-012  
 C3 4.33814531e-017  
 35 C4 -7.40125614e-021  
 C5 5.66856812e-025  
 C6 0.00000000e+000  
 C7 0.00000000e+000  
 C8 0.00000000e+000  
 40 C9 0.00000000e+000

## Asphäre der Linse L815

45 K 0.0000  
 C1 -3.15395039e-008  
 C2 4.30010133e-012  
 C3 3.11663337e-016  
 C4 -3.64089769e-020  
 50 C5 1.06073268e-024  
 C6 0.00000000e+000  
 C7 0.00000000e+000  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

55

60

65

## Asphäre der Linse L816

K 0.0000  
 C1 -2.16574623e-008  
 C2 -6.67182801e-013  
 C3 4.46519932e-016  
 C4 -3.71571535e-020  
 C5 0.00000000e+000  
 C6 0.00000000e+000  
 C7 0.00000000e+000  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

5

10

## Asphäre der Linse L817

15

K 0.0000  
 C1 2.15121397e-008  
 C2 -1.65301726e-011  
 C3 -5.03883747e-015  
 C4 1.03441815e-017  
 C5 -6.29122773e-021  
 C6 1.44097714e-024  
 C7 0.00000000e+000  
 C8 0.00000000e+000  
 C9 0.00000000e+000

20

25

## Patentansprüche

30

1. Objektiv (611, 711), insbesondere ein Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), mit einer Mehrzahl von Linsen (L601-L630, L801-L817), mit mindestens einer Linse (1) aus Fluorid-Kristall, dadurch gekennzeichnet, daß die mindestens eine Linse (1) eine (100)-Linse mit einer Linsenachse (RA) ist, welche annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht.

35

2. Objektiv nach Anspruch 1, wobei die (100)-Linse eine rotationssymmetrische Linse mit einer Symmetrieachse ist und die Symmetrieachse mit der Linsenachse der (100)-Linse zusammenfällt.

3. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 2 mit einer optischen Achse (OA), wobei die Linsenachse der (100)-Linse mit der optischen Achse des Objektivs zusammenfällt.

4. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei innerhalb des Objektivs Lichtstrahlen von einer Objekzebene (O) zu einer Bildebene (O') verlaufen und mindestens ein Lichtstrahl (609, 713, 715) innerhalb der (100)-Linse einen Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweist, der größer als 25°, insbesondere größer als 30° ist.

40

5. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei innerhalb des Objektivs Lichtstrahlen von einer Objekzebene zu einer Bildebene verlaufen und alle Lichtstrahlen innerhalb der (100)-Linse Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweisen, die maximal 45°, insbesondere maximal

45

$$\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$$

50

betragen, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet und  $n_{FK}$  die Brechzahl des Fluorid-Kristalls.

6. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 5 mit einer Blendenebene, wobei die Blendenebene einen Blendendurchmesser aufweist und wobei die (100)-Linse einen Linsendurchmesser aufweist und wobei der Linsendurchmesser kleiner als 85%, insbesondere kleiner als 80% des Blendendurchmessers ist.

7. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 6 mit einer Bildebene, wobei die (100)-Linse (L630, L817) die der Bildebene nächste Linse ist.

55

8. Objektiv (611, 711), insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, mit mindestens zwei Linsen oder Linsenteilen aus Fluorid-Kristall,

wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen, welche jeweils annähernd in eine Hauptkristallrichtung weisen,

60

wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft,

welche jeweils einen Azimutwinkel  $\alpha_R$ , einen Öffnungswinkel  $\theta_R$  und einen optischen Wegunterschied  $\Delta OPL$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände aufweisen,

dadurch gekennzeichnet,

daß die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_R$  und des Öffnungswinkels  $\theta_R$  wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander um die Linsenachsen ver-

65

dreht angeordnet sind.

9. Objektiv nach Anspruch 8, wobei die optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  als Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_R$  für einen vorgegebenen Öffnungswinkel  $\theta_0$  weniger als 30%, insbesondere weniger als 20% variieren.

10. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 oder 9, wobei die Linsen oder Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  aufweisen, deren Doppelbrechungswerte  $\Delta n$  von Azimutwinkeln  $\alpha_L$  bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_R$  bezüglich der Linsenachse abhängen, wobei die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist, wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel  $\gamma$  definiert sind, wobei eine Anzahl von n Linsen oder n Linsenteilen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilungen  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen, wobei für den Drehwinkel  $\gamma$  zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen einer Gruppe gilt:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$

wobei m eine ganze Zahl ist.

11. Objektiv nach Anspruch 10, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der Linsen oder Linsenteile jeweils einen Öffnungswinkel  $\theta_L$  aufweist und wobei die Öffnungswinkel  $\theta_L$  innerhalb der Linsen oder Linsenteile der Gruppe maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.

12. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 oder 11, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der Linsen oder Linsenteile jeweils einen Strahlweg  $RL_L$  zurücklegt und wobei die Strahlwege  $RL_L$  innerhalb der Linsen oder Linsenteile der Gruppe maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.

13. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 bis 12, wobei die bei Drehwinkel  $\gamma = 0^\circ$  für die einzelnen Linsen oder Linsenteile einer Gruppe bestimmten optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  für einen äußersten Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.

14. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 bis 13, wobei die Gruppe 2 bis 4 Linsen oder Linsenteile umfaßt.

15. Objektiv nach Anspruch 14, wobei die Linsen (L629, L630) oder Linsenteile benachbart angeordnet sind, insbesondere aneinander angesprengt sind.

16. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 bis 15, wobei das Objektiv mindestens zwei Gruppen mit jeweils gegeneinander verdrehten Linsen oder Linsenteilen aufweist.

17. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 16, wobei die Linsenachsen in die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  der Linsen oder Linsenteile eine 3-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.

18. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 16, wobei die Linsenachsen in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  der Linsen oder Linsenteile eine 4-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.

19. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 16, wobei die Linsenachsen in die  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  der Linsen oder Linsenteile eine 2-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.

20. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 19, wobei die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer ersten Gruppe in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer zweiten Gruppe in die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

21. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 19, wobei die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer ersten Gruppe in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer zweiten Gruppe in die  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

22. Objektiv nach Anspruch 20 oder 21, wobei sich die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  aus einer ersten Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$ , welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen ersten Gruppen hervorgerufen wird, und einer zweiten Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$ , welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen zweiten Gruppen hervorgerufen wird, zusammensetzt und sich der Betrag des Maximalwerts der ersten Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$  maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% vom Betrag des Maximalwertes der zweiten Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$  unterscheidet.

23. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 8 bis 22, wobei die Linsen oder Linsenteile zu einer Vielzahl von optischen Elementen mit optischen Flächen gehören, und wobei mindestens eine optische Fläche mit einer Kompensations-Beschichtung (613) belegt ist, wobei die Kompensations-Beschichtung derart ausgelegt ist, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_R$  und des Öffnungswinkels  $\theta_R$  wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu einem Objektiv ohne eine Kompensations-Beschichtung.

24. Objektiv (611) nach Anspruch 23, wobei das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung eine Elementachse aufweist, und wobei die Kompensations-Beschichtung eine effektive Doppelbrechungsverteilung aufweist, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln  $\alpha_F$  bezüglich einer zur Elementachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_F$  bezüglich der Elementachse abhängen.

25. Objektiv nach Anspruch 24, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung für den Öffnungswinkel  $\theta_F = 0^\circ$  annähernd Null ist.

26. Objektiv nach einem der Ansprüche 24 und 25, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung primär nur

vom Öffnungswinkel  $\theta_F$  abhängt.

27. Objektiv nach einem der Ansprüche 23 bis 26, wobei das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung eine der Linsen aus Fluorid-Kristall ist, und wobei die Elementachse die Linsenachse der Linse aus Fluorid-Kristall ist.

28. Objektiv nach einem der Ansprüche 23 bis 27, wobei mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind. 5

29. Objektiv nach einem der Ansprüche 23 bis 28, wobei alle optischen Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind.

30. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 29, wobei der Fluorid Kristall ein Kalzium-Fluorid Kristall, ein Strontium-Fluorid-Kristall oder ein Barium-Fluorid-Kristall ist. 10

31. Objektiv (611), insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, mit mehreren optischen Elementen, insbesondere Linsen aus Fluorid-Kristall, mit optischen Flächen, wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft, welche jeweils einen optischen Wegunterschied  $\Delta OPL$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände aufweisen, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine optische Fläche mit einer Kompensations-Beschichtung (613) belegt ist, wobei die Kompensations-Beschichtung derart ausgelegt ist, daß die optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  des Strahlbüschels wesentlich reduzierte Werte aufweisen im Vergleich zu einem Objektiv ohne eine Kompensations-Beschichtung. 15

32. Objektiv nach Anspruch 31, wobei das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung eine Elementachse aufweist, und wobei die Kompensations-Beschichtung eine effektive Doppelbrechungsverteilung aufweist, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln  $\alpha_F$  bezüglich einer zur Elementachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_F$  bezüglich der Elementachse abhängen. 20

33. Objektiv nach Anspruch 32, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung für den Öffnungswinkel  $\theta_F = 0^\circ$  annähernd Null ist.

34. Objektiv nach einem der Ansprüche 32 und 33, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung primär vom Öffnungswinkel  $\theta_F$  abhängt. 25

35. Objektiv nach einem der Ansprüche 32 bis 36, wobei das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung austauschbar ist.

36. Objektiv nach einem der Ansprüche 31 bis 35, wobei mindestens zwei optische Elemente Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall sind, wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen, wobei die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_R$  und des Öffnungswinkels  $\theta_R$  wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind. 30

37. Objektiv nach Anspruch 36, wobei die optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL$  als Funktion des Azimutwinkels  $\alpha_R$  für einen vorgegebenen Öffnungswinkel  $\theta_0$  weniger als 30%, insbesondere weniger als 20% variieren. 35

38. Objektiv nach einem der Ansprüche 36 oder 37, wobei die Linsen oder Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  aufweisen, deren Doppelbrechungswerte  $\Delta n$  von Azimutwinkeln  $\alpha_L$  bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_L$  bezüglich der Linsenachse abhängen, 40

wobei die Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist,

wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel  $\gamma$  definiert sind,

wobei eine Anzahl von n Linsen oder n Linsenteilen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilungen  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen, wobei für den Drehwinkel  $\gamma$  zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen einer Gruppe gilt: 45

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$

wobei m eine ganze Zahl ist. 50

39. Objektiv nach einem der Ansprüche 36 bis 38, wobei das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung eine der Linsen aus Fluoridkristall ist, und wobei die Elementachse die Linsenachse der Linse aus Fluoridkristall ist.

40. Objektiv nach einem der Ansprüche 30 bis 39, wobei mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind. 55

41. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 40, wobei das Objektiv eine bildseitige numerische Apertur NA aufweist und die bildseitige numerische Apertur NA größer als 0,7, insbesondere größer als 0,8 ist.

42. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 41, wobei das Objektiv für Wellenlängen kleiner 200 nm ausgelegt ist. 60

43. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 42, wobei das Objektiv für Wellenlängen kleiner 160 nm ausgelegt ist.

44. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 43, wobei das Objektiv (611) ein refraktives Objektiv ist.

45. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 44, wobei das Objektiv ein katadioptrisches Objektiv (711) mit Linsen und mindestens einem Spiegel (Sp2) ist. 65

46. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 45, wobei alle Linsen aus Kalzium-Fluorid sind.

47. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), umfassend ein Beleuchtungssystem (83),

ein Objektiv 85) nach einem der Ansprüche 1 bis 46, das eine Struktur tragende Maske (89) auf ein lichtempfindliches Substrat (815) abbildet.

48. Verfahren zur Herstellung von Halbleiter-Bauelementen mit einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81) nach Anspruch 47.

49. Verfahren zur Herstellung von Objektiven, insbesondere von Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, mit mindestens zwei Linsen oder Linsenteilen aus Fluorid-Kristall, wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen, welche jeweils annähernd in eine Hauptkristallrichtung weisen,

dadurch gekennzeichnet,

daß für ein Strahlbüschel mit Strahlen, welche jeweils einen Azimutwinkel  $\alpha_R$ , einen Öffnungswinkel  $\theta_R$  und einen optischen Wegunterschied  $\Delta OPL$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen, die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  für Linsen oder Linsenteile bestimmt wird, daß die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart verdreht angeordnet werden, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  des Strahlbüschels wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind.

50. Verfahren nach Anspruch 49, wobei das Objektiv eine erste Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen und eine zweite Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen aufweist und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der ersten Gruppe in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der zweiten Gruppe in die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

51. Verfahren nach Anspruch 49, wobei das Objektiv eine erste Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen und eine zweite Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen aufweist und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der ersten Gruppe in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der zweiten Gruppe in die  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

52. Verfahren nach einem der Ansprüche 49 bis 51,

wobei für ein Strahlbüschel mit Strahlen, welche jeweils einen Azimutwinkel  $\alpha_R$ , einen Öffnungswinkel  $\theta_R$  und einen optischen Wegunterschied  $\Delta OPL$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen, eine Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ , wobei aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  eine effektive Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung zur Reduzierung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  bestimmt wird,

wobei die effektive Doppelbrechungswerte der Kompensations-Beschichtung von Azimutwinkeln  $\alpha_F$  bezüglich einer zu einer Elementachse des optischen Elements senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_F$  bezüglich der Elementachse abhängen,

wobei aus der Doppelbrechungsverteilung der Aufbau einer Kompensations-Beschichtung bestimmt wird, und wobei ein optisches Element des Objektivs mit der Kompensations-Beschichtung belegt wird.

53. Verfahren zur Kompensation von Doppelbrechungs-Effekten in Objektiven, insbesondere in Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, wobei das Objektiv mehrere optische Elemente, insbesondere Linsen aus Fluorid-Kristall, mit optischen Flächen aufweist,

wobei mindestens ein optisches Element austauschbar ist,

wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft, welche jeweils einen Azimutwinkel  $\alpha_R$ , einen Öffnungswinkel  $\theta_R$  und einen optischen Wegunterschied  $\Delta OPL$  für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen,

wobei eine Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  bestimmt wird,

wobei aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede  $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$  eine effektive Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung bestimmt wird, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln  $\alpha_F$  bezüglich einer zu einer Elementachse des optischen Elements senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_F$  bezüglich der Elementachse abhängen,

wobei aus der effektiven Doppelbrechungsverteilung der Aufbau einer Kompensations-Beschichtung bestimmt wird, wobei das austauschbare optische Element aus dem Objektiv entfernt wird,

wobei das austauschbare optische Element mit der Kompensations-Beschichtung belegt wird und

wobei das austauschbare optische Element mit der Kompensations-Beschichtung wieder in das Objektiv eingebaut wird.

54. Linsenherstellverfahren, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Platten aus gegeneinander hinsichtlich der Kristallorientierung verdrehtem Kristallmaterial, vorzugsweise Fluorid-Kristall und insbesondere Kalziumfluorid, optisch nahtlos gefügt, insbesondere angesprengt werden und anschließend als ein einheitliches Blank formgebend bearbeitet und poliert werden.

55. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 54, wobei die Platten jeweils eine Doppelbrechungsverteilung  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  aufweisen, deren Doppelbrechungswerte  $\Delta n$  von Azimutwinkeln  $\alpha_L$  bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln  $\theta_L$  bezüglich der Linsenachse abhängen und welche eine k-zählige Azimutalsymmetrie aufweist,

wobei für eine Anzahl von N Platten die Flächennormalen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Doppelbrechungsverteilungen  $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$  bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen,

wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Platten Drehwinkel  $\gamma$  definiert sind, wobei für den Drehwinkel

$\gamma$  zwischen je zwei Platten gilt:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$

wobei m eine ganze Zahl ist.

56. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 55, wobei zwei Platten nahtlos gefügt werden.

57. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 55 und 56, wobei die Platten annähernd gleiche Dicke aufweisen.

58. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 54 bis 57, wobei bei ersten Platten die Flächennormalen in die  $\langle 111 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und bei zweiten Platten die Flächennormalen in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

59. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 58, wobei die ersten Platten eine annähernd gleiche erste Dicke aufweisen und die zweiten Platten eine annähernd gleiche zweite Dicke aufweisen und das Verhältnis der Summe der ersten Dicken zur Summe der zweiten Dicken  $1.5 \pm 0.2$  ist.

60. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 54 bis 57, wobei bei ersten Platten die Flächennormalen in die  $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und bei zweiten Platten die Flächennormalen in die  $\langle 100 \rangle$ -Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

61. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 60, wobei die ersten Platten eine annähernd gleiche erste Dicke aufweisen und die zweiten Platten eine annähernd gleiche zweite Dicke aufweisen und das Verhältnis der Summe der ersten Dicken zur Summe der zweiten Dicken  $4.0 \pm 0.4$  ist.

62. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 60 und 61, wobei zwei erste Platten mit einer zweiten Platte optisch nahtlos gefügt werden.

63. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 60 und 61, wobei vier erste Platten mit zwei zweiten Platte optisch nahtlos gefügt werden.

64. Linse, gekennzeichnet durch die Herstellung nach einem der Ansprüche 54 bis 63.

65. Objektiv, insbesondere ein Projektionsobjektiv (611, 711) für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse nach Anspruch 64 umfaßt.

66. Objektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 46, dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse nach Anspruch 64 umfaßt.

Hierzu 27 Seite(n) Zeichnungen

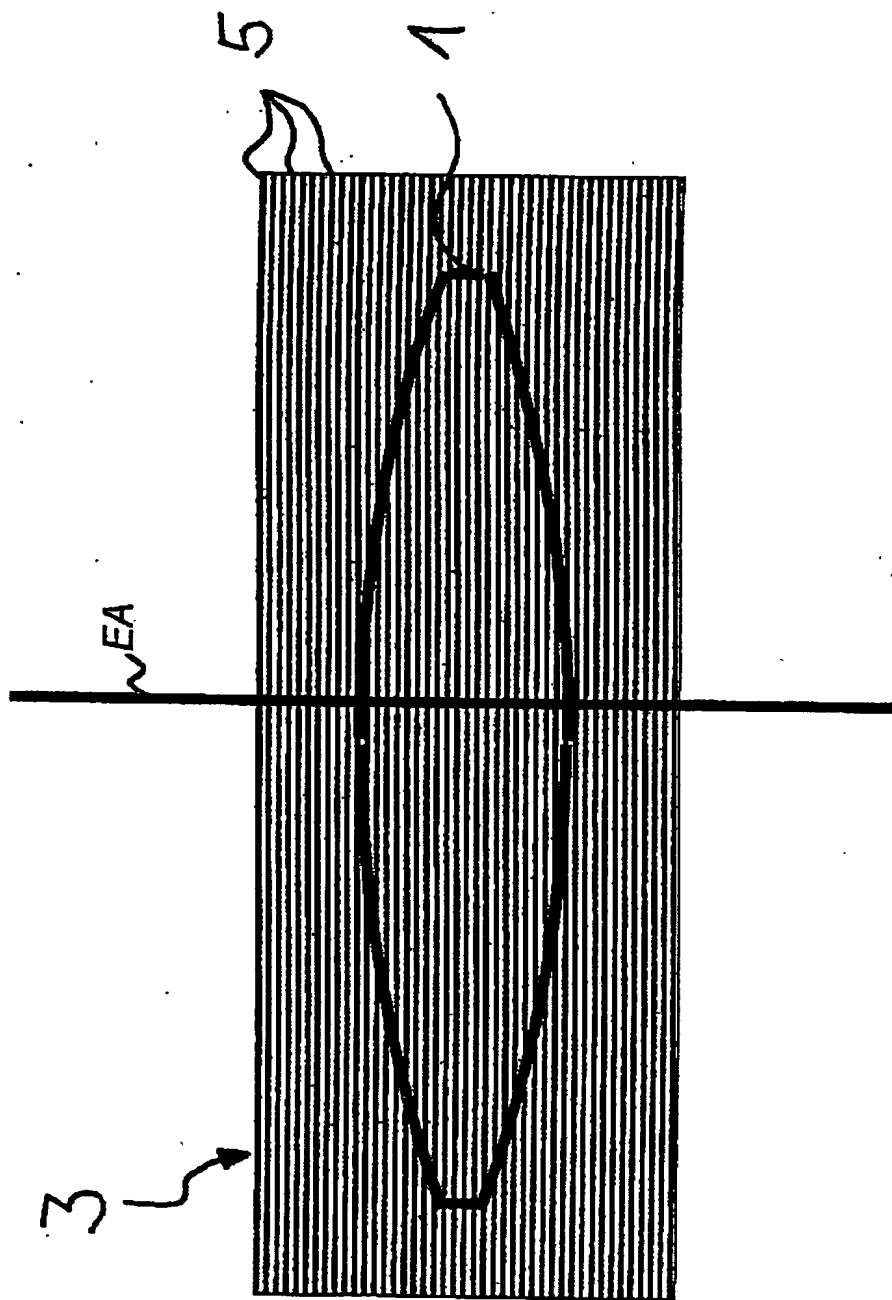


Fig. 1

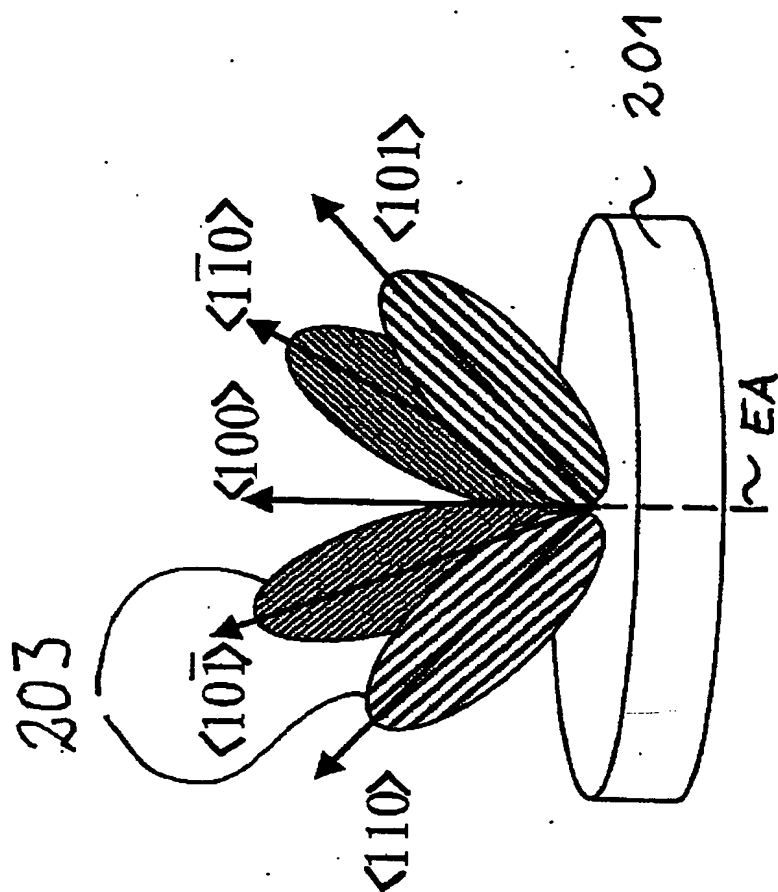


Fig. 2A



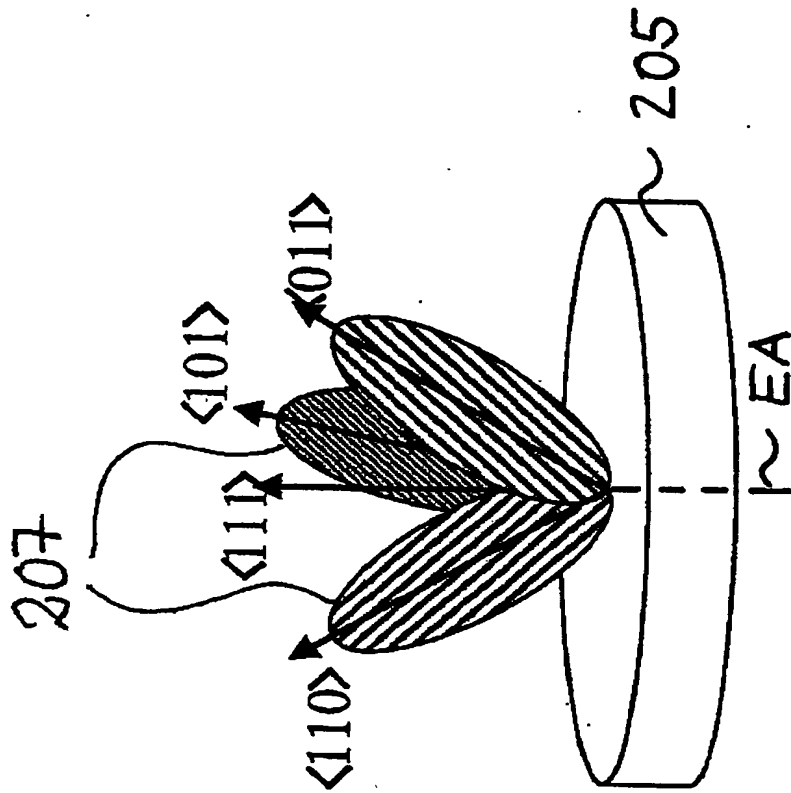


Fig. 2B

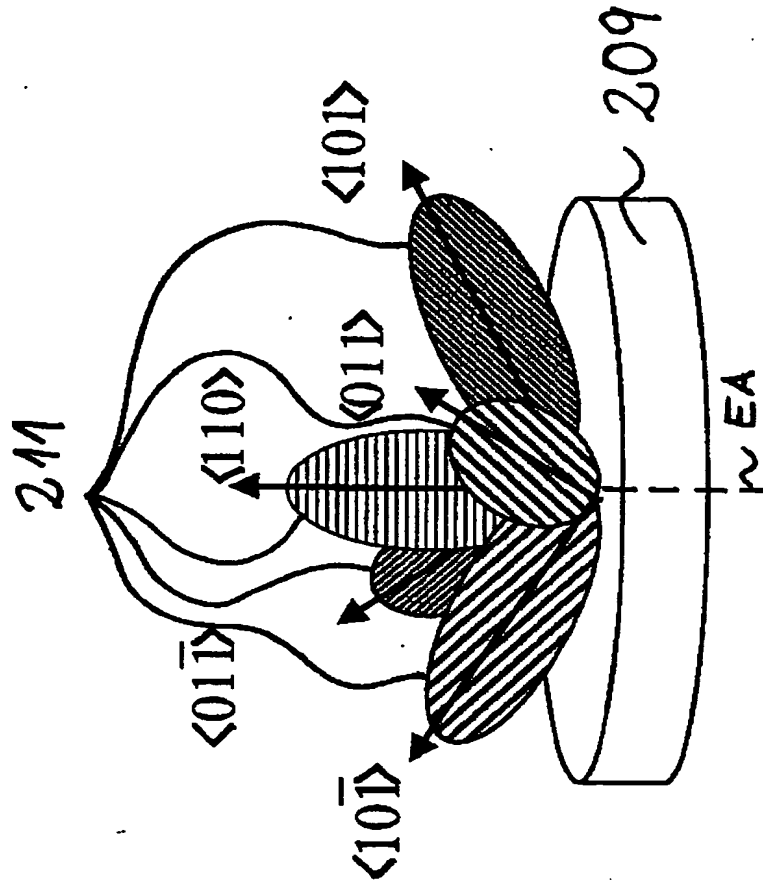


Fig. 2C

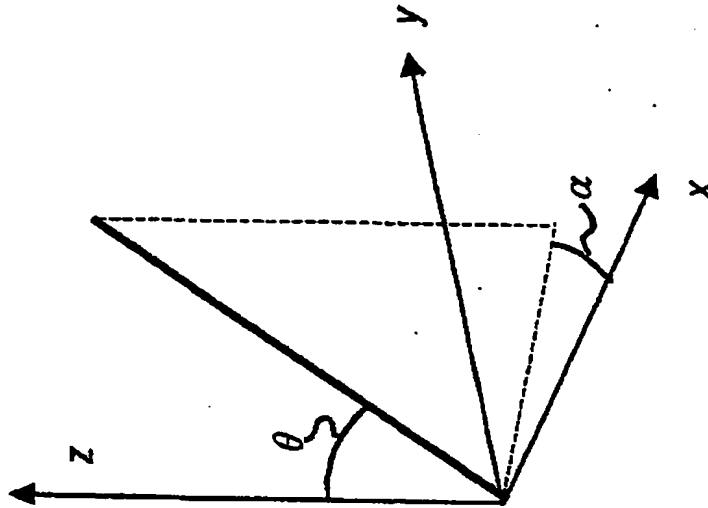


Fig. 3

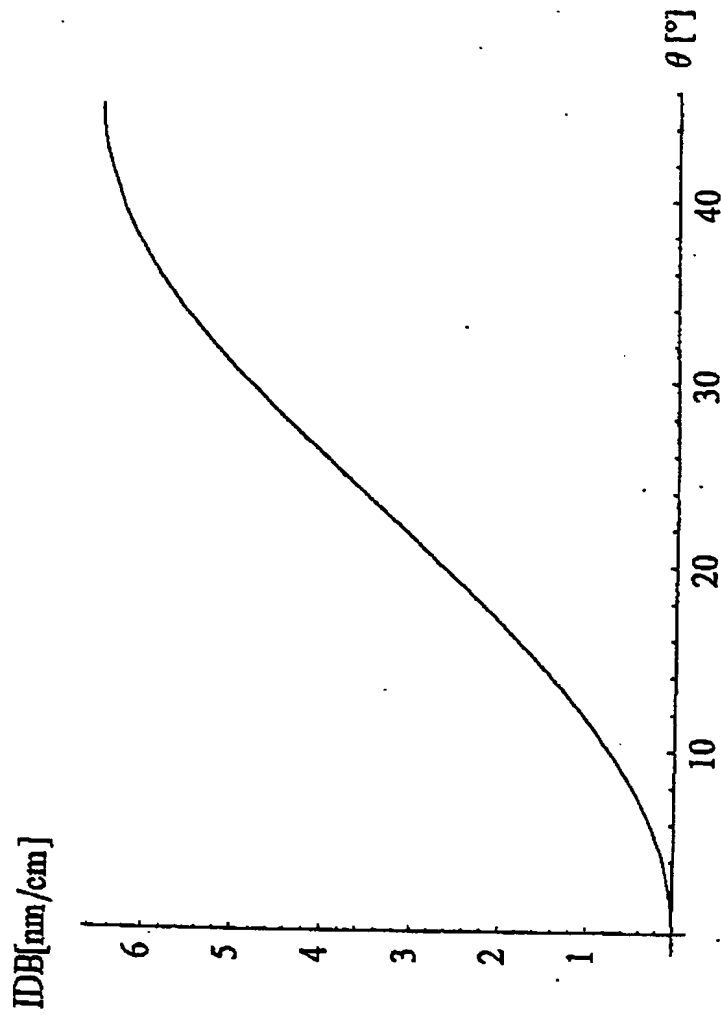


Fig. 4A

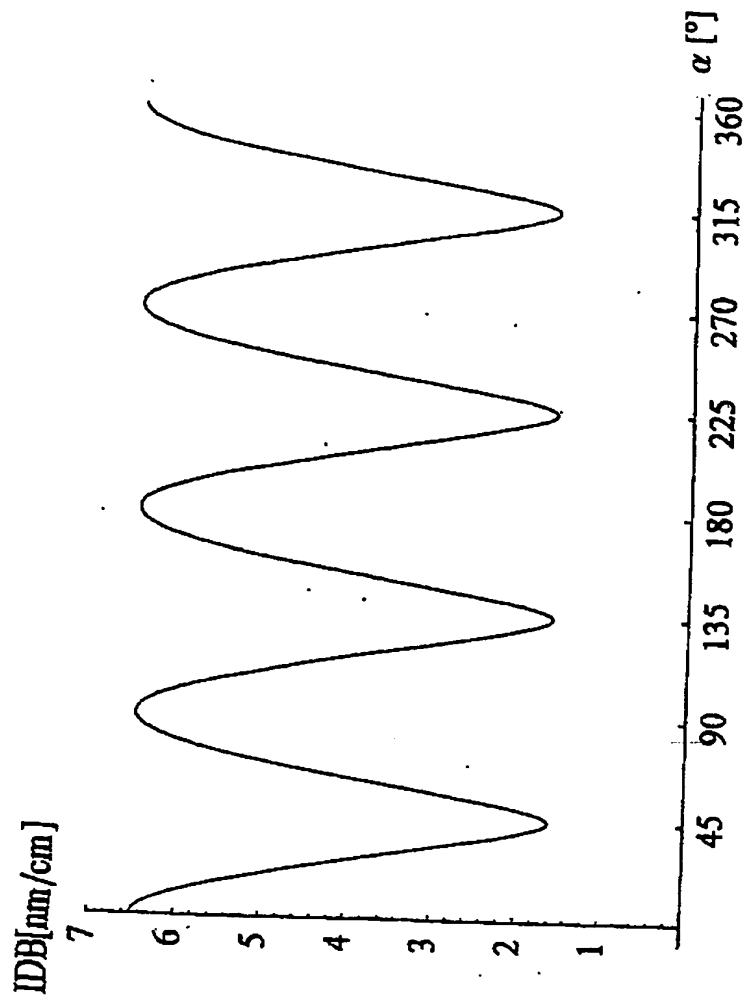


Fig. 4B

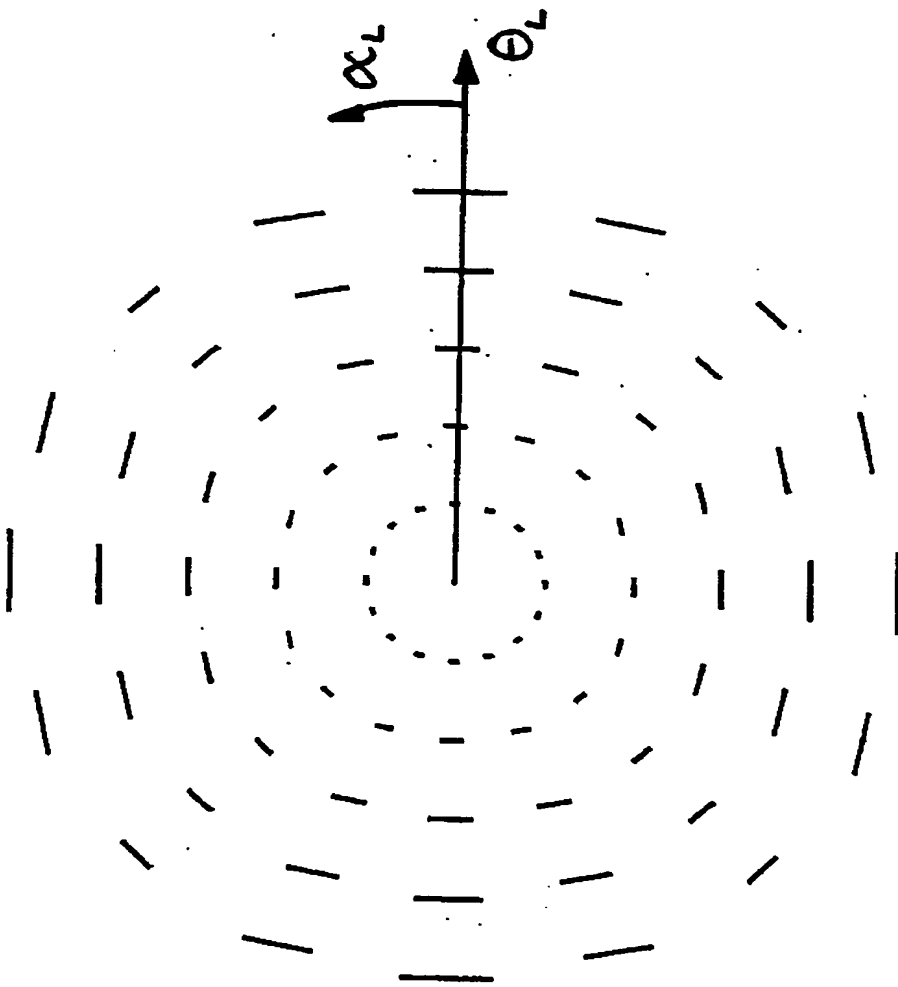


Fig. 4C

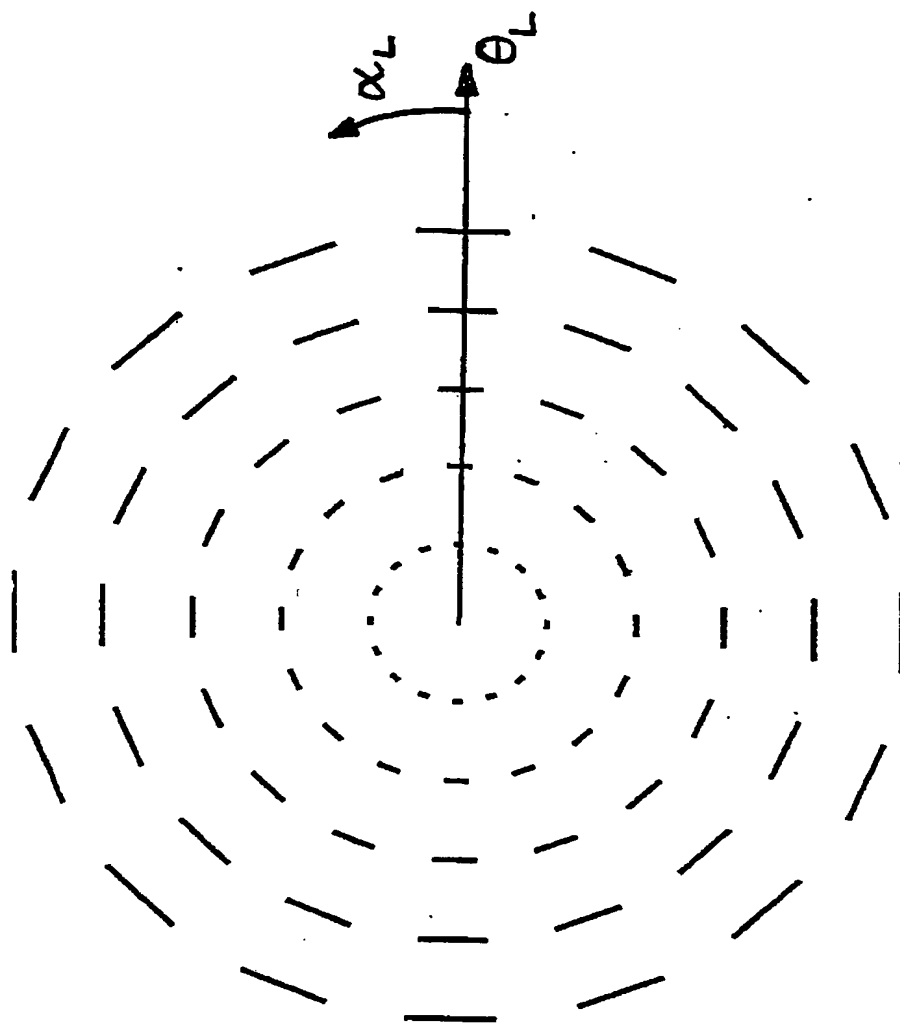


Fig. 4D

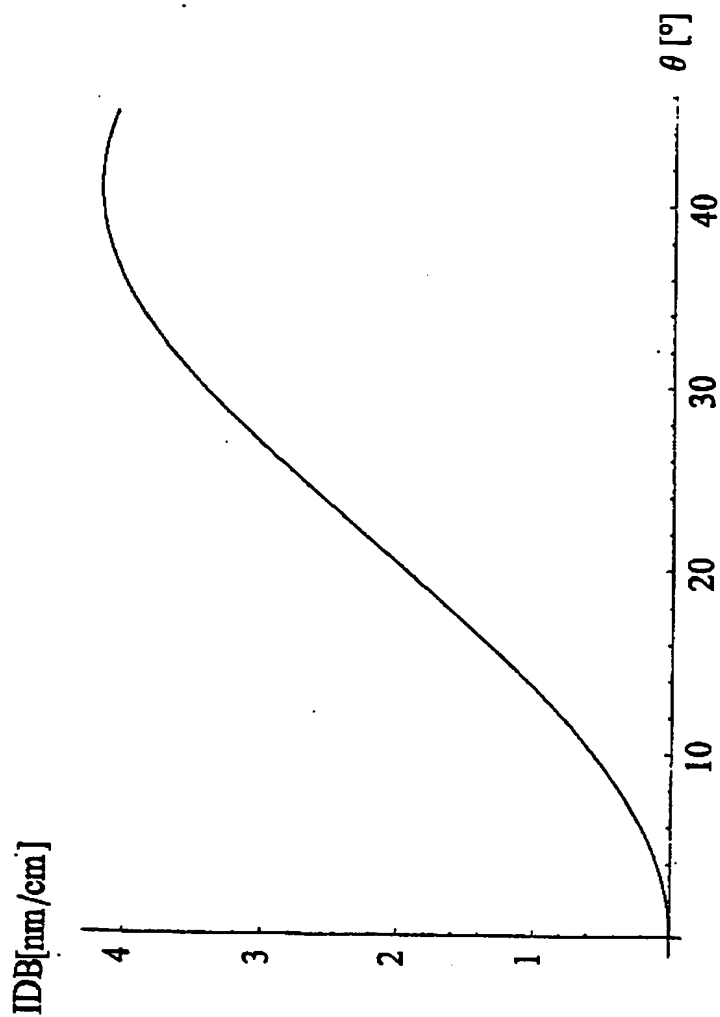


Fig. 4E



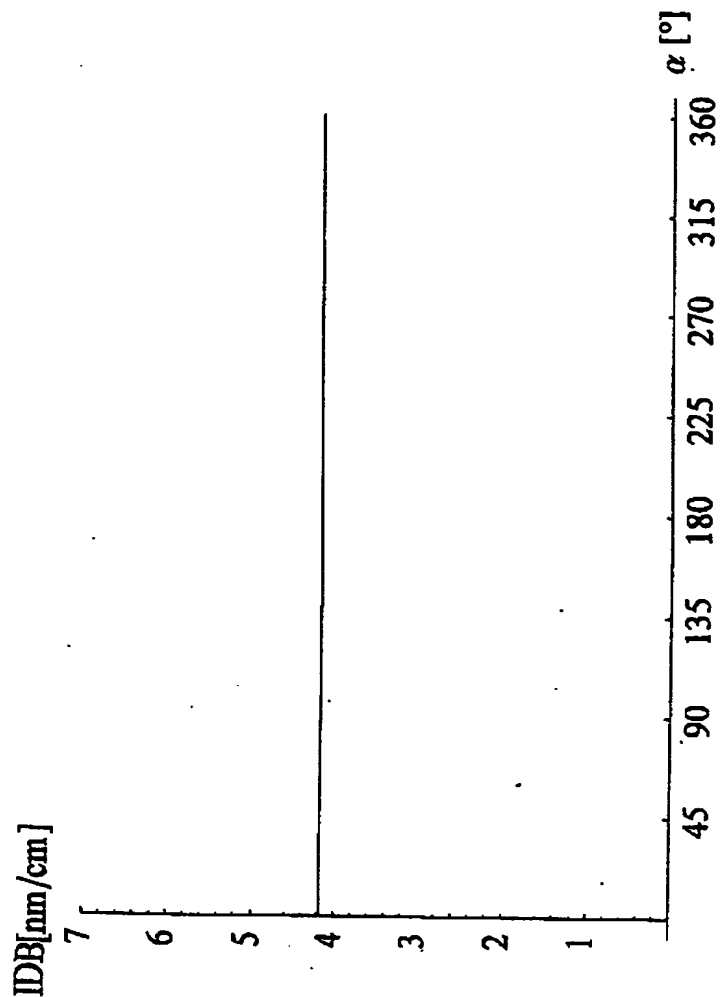


Fig. 4 F

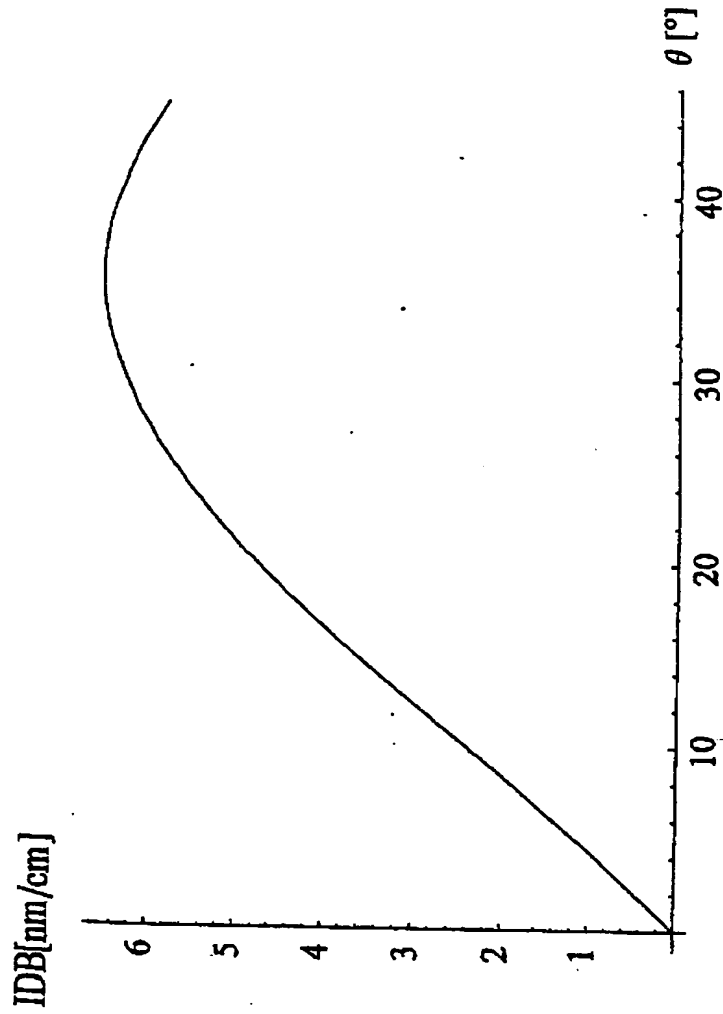


Fig. 5A

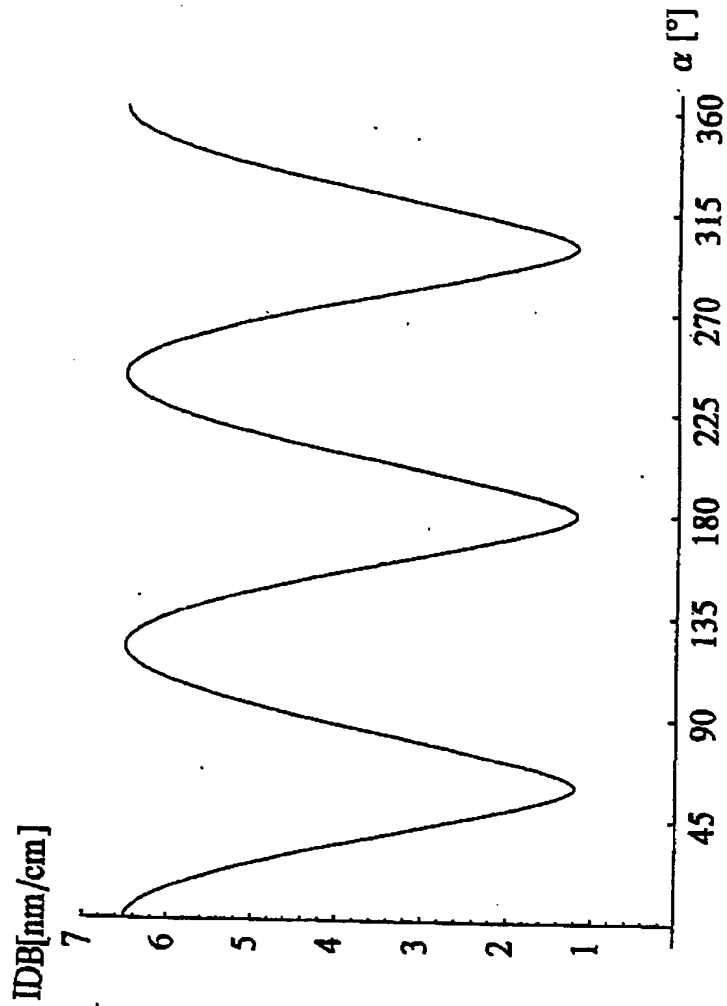


Fig. 5B

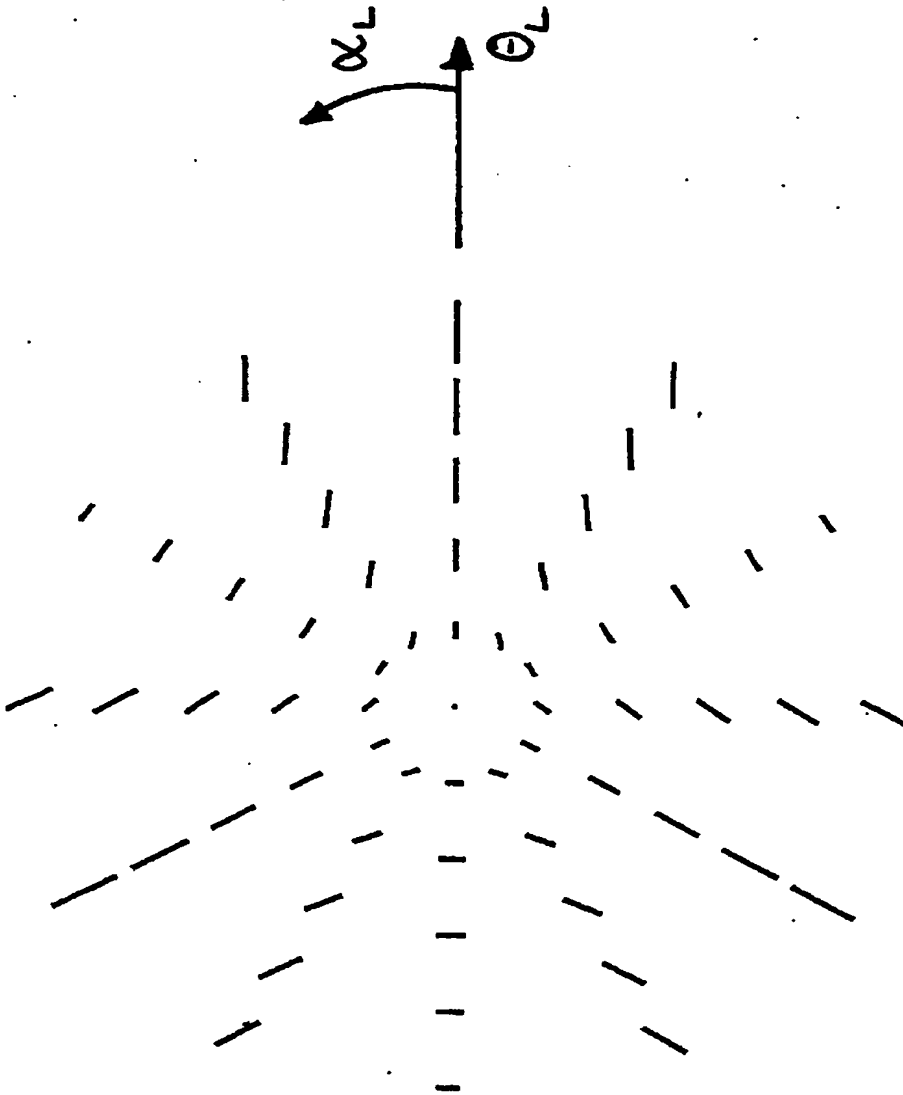


Fig. 5C

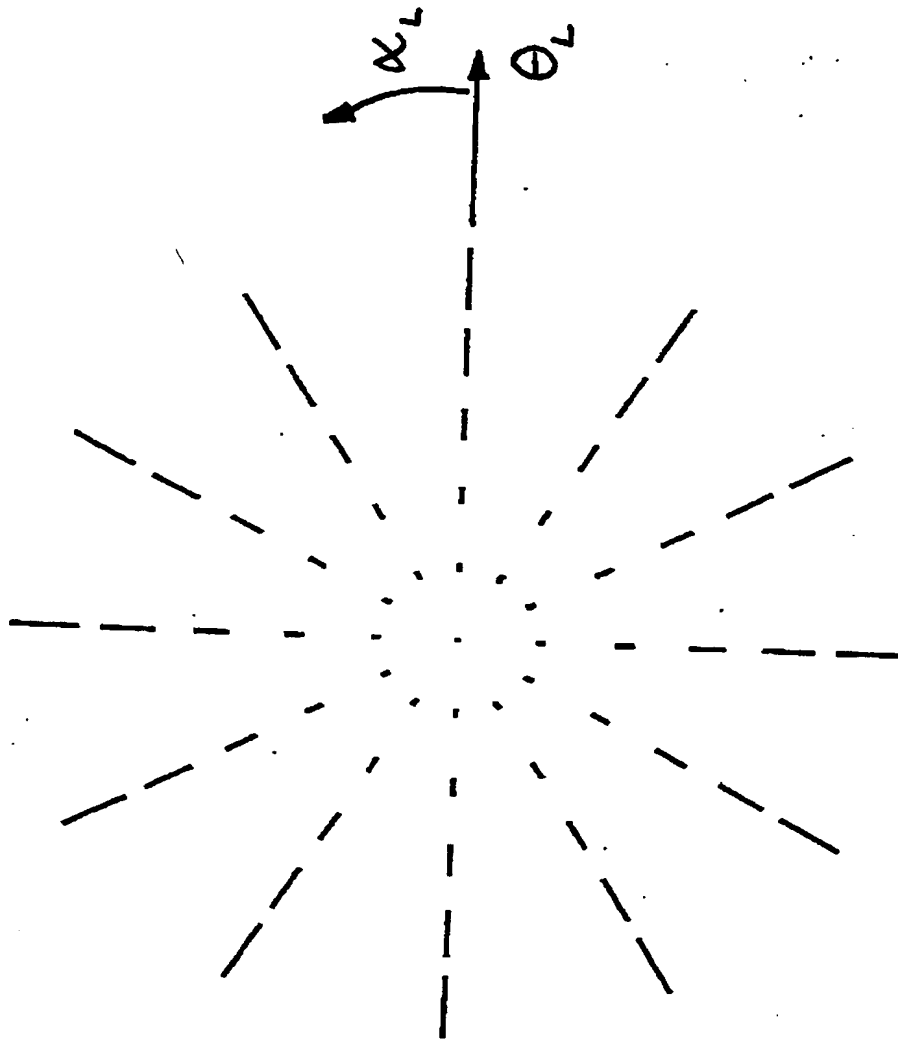


Fig. 5D

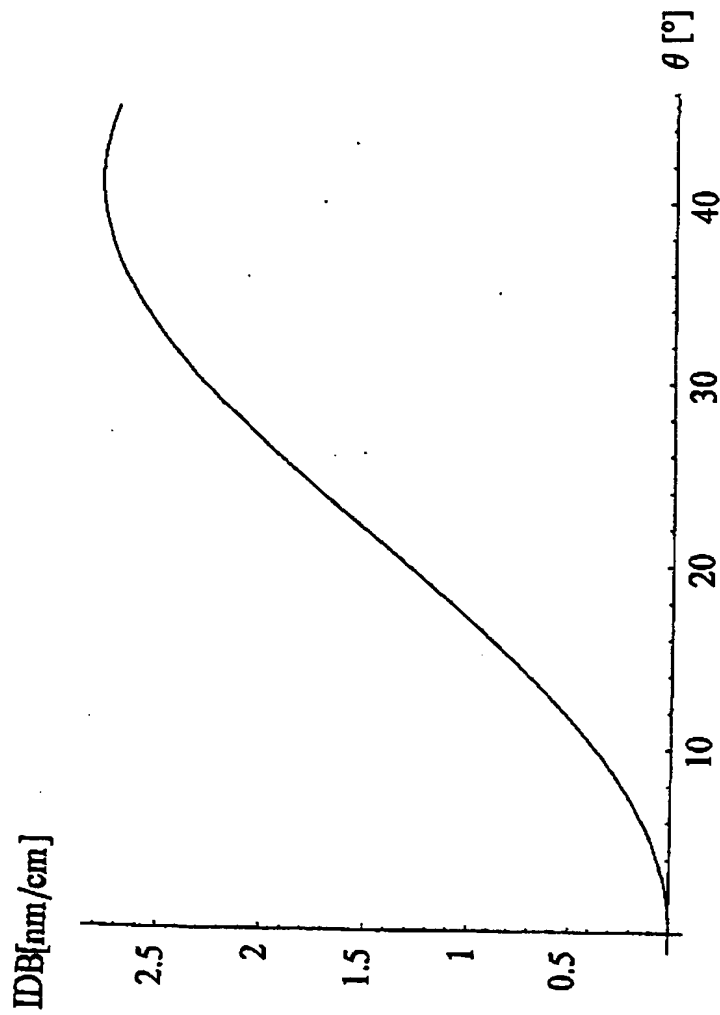


Fig. 5 E

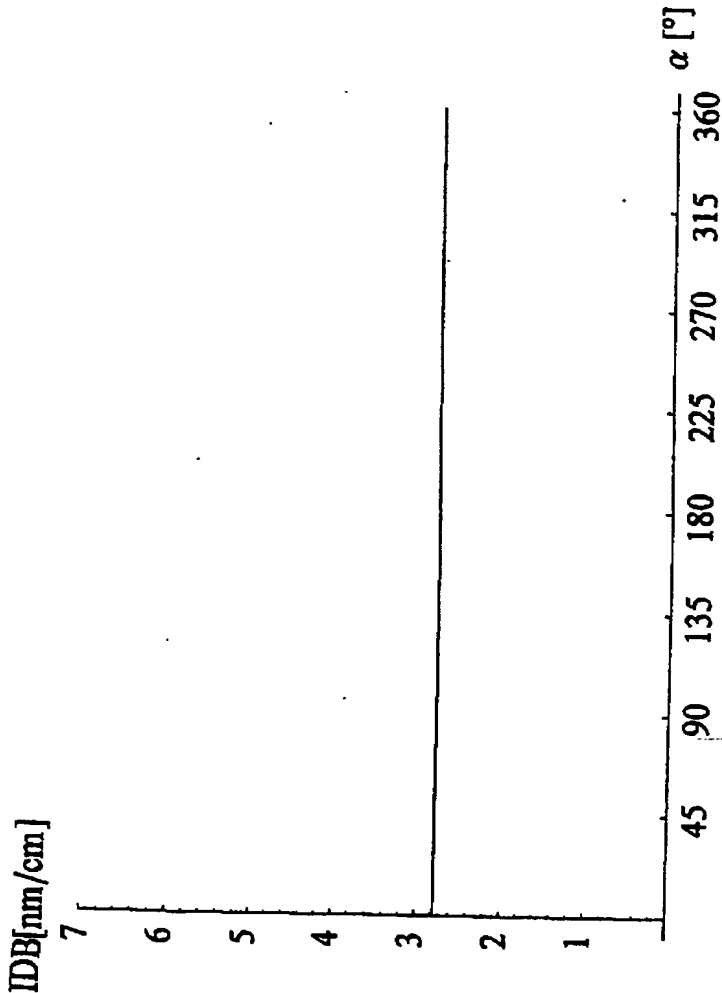


Fig. 5 F

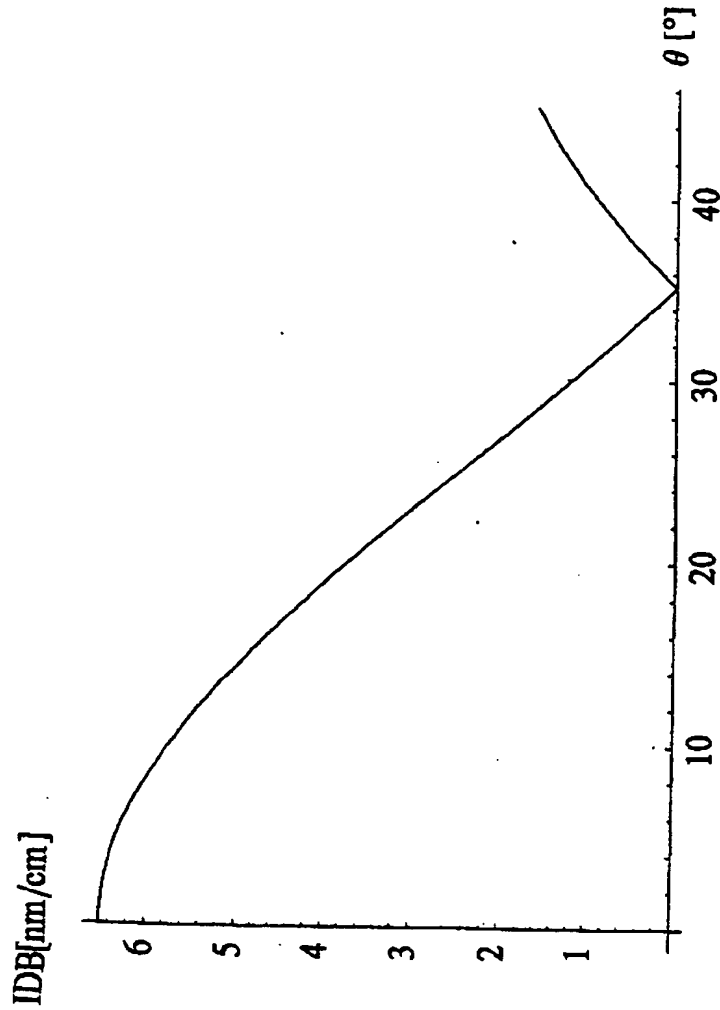


Fig. 6A



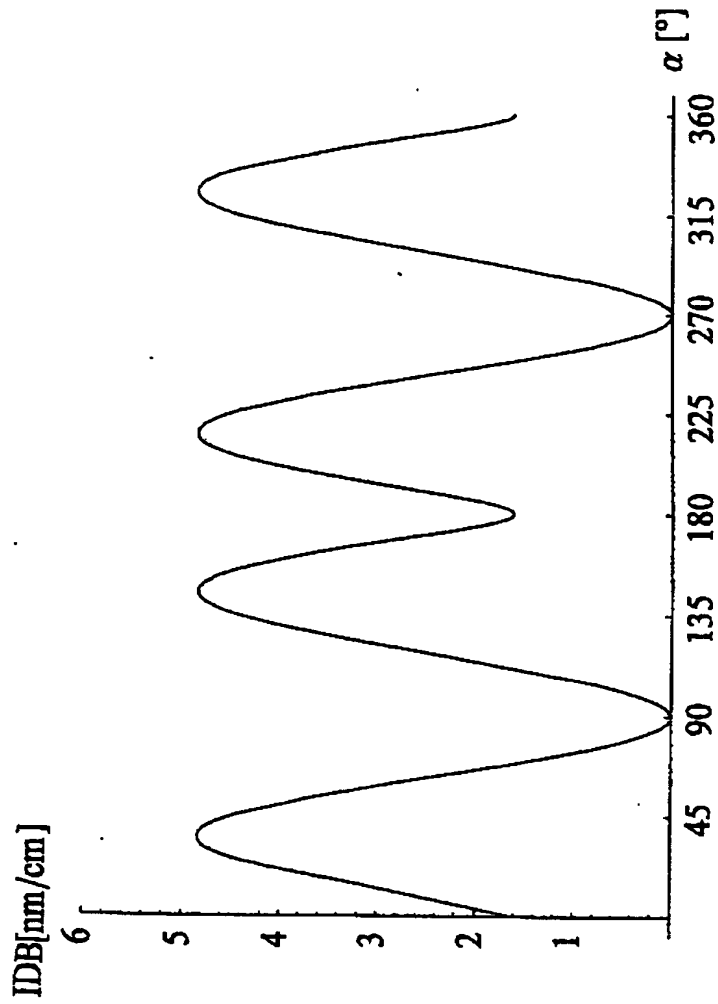


Fig. 6B

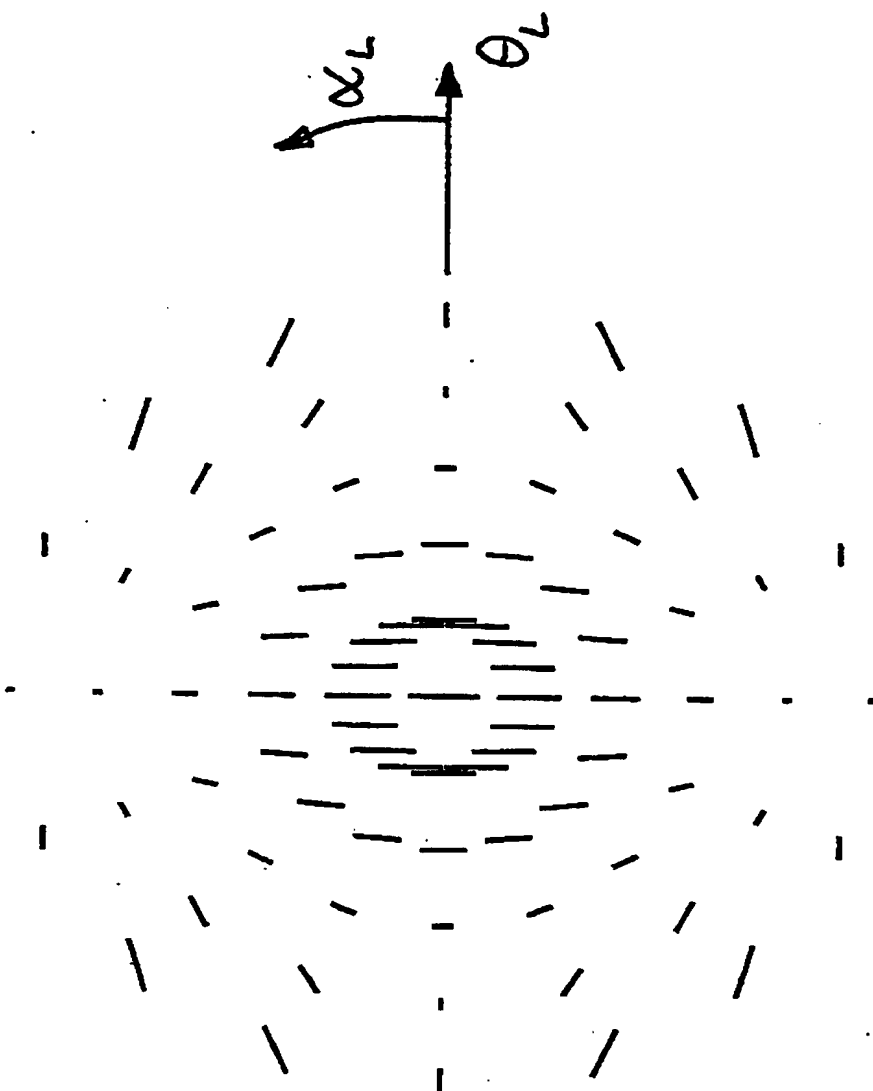


Fig. 6C

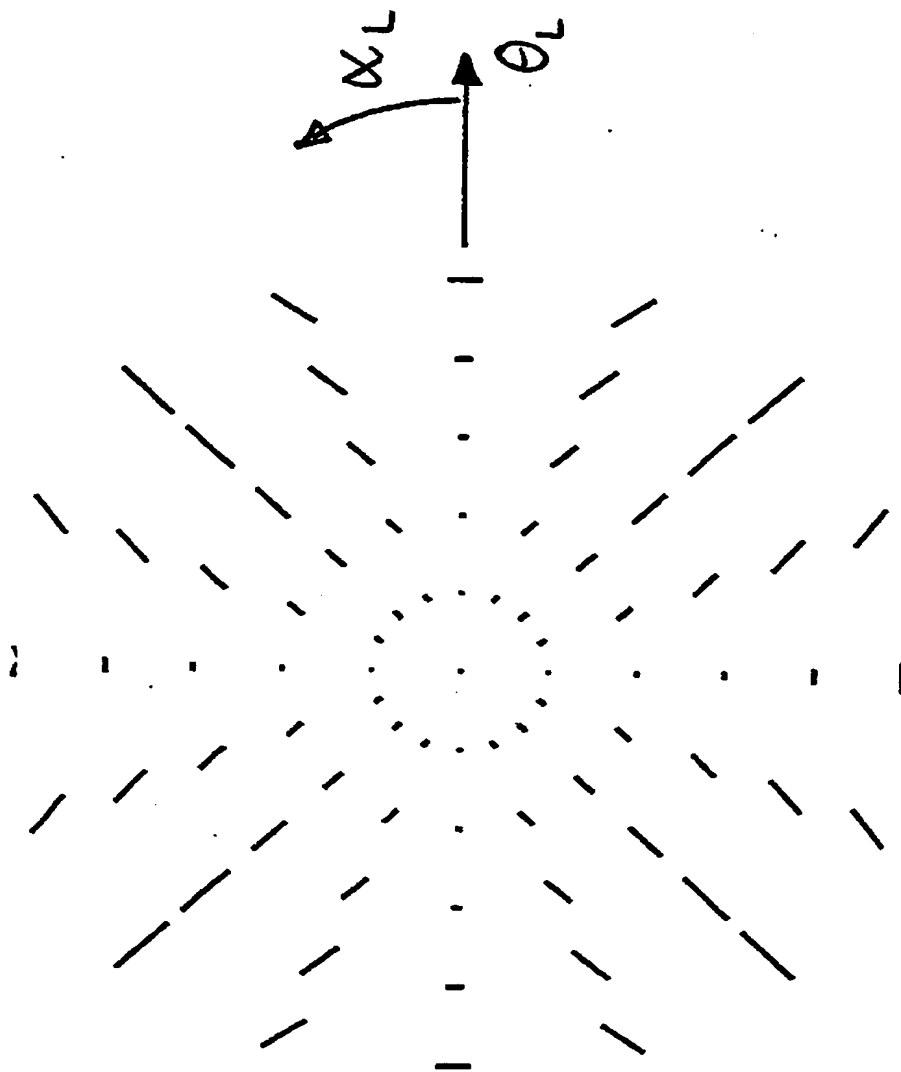


Fig. 6D

4x [110]

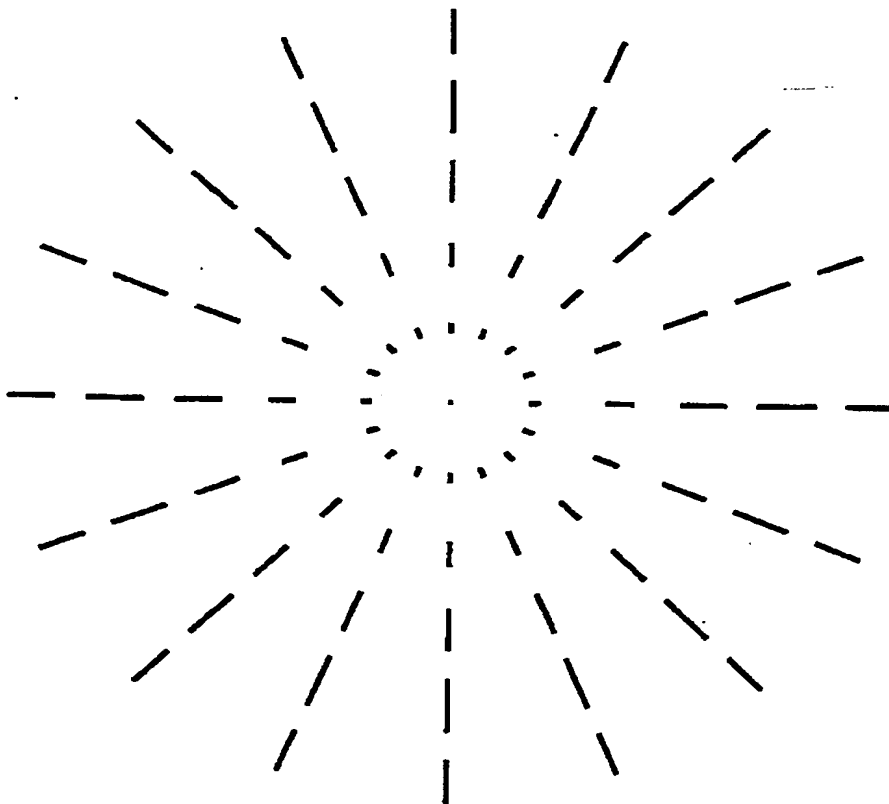


Fig. 6E

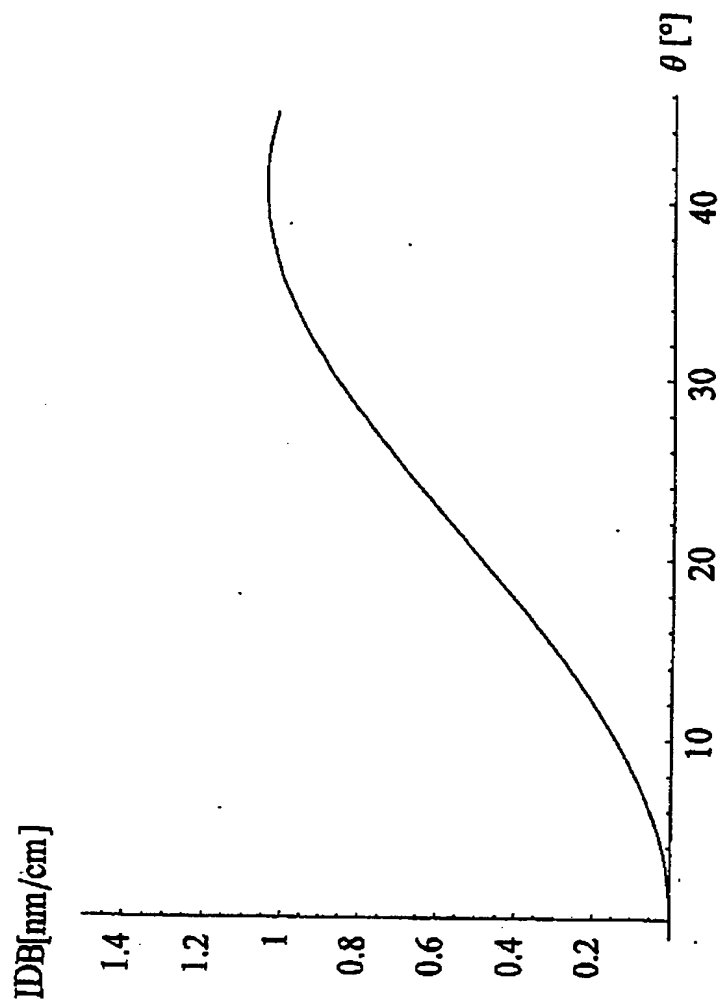


Fig. 6 F

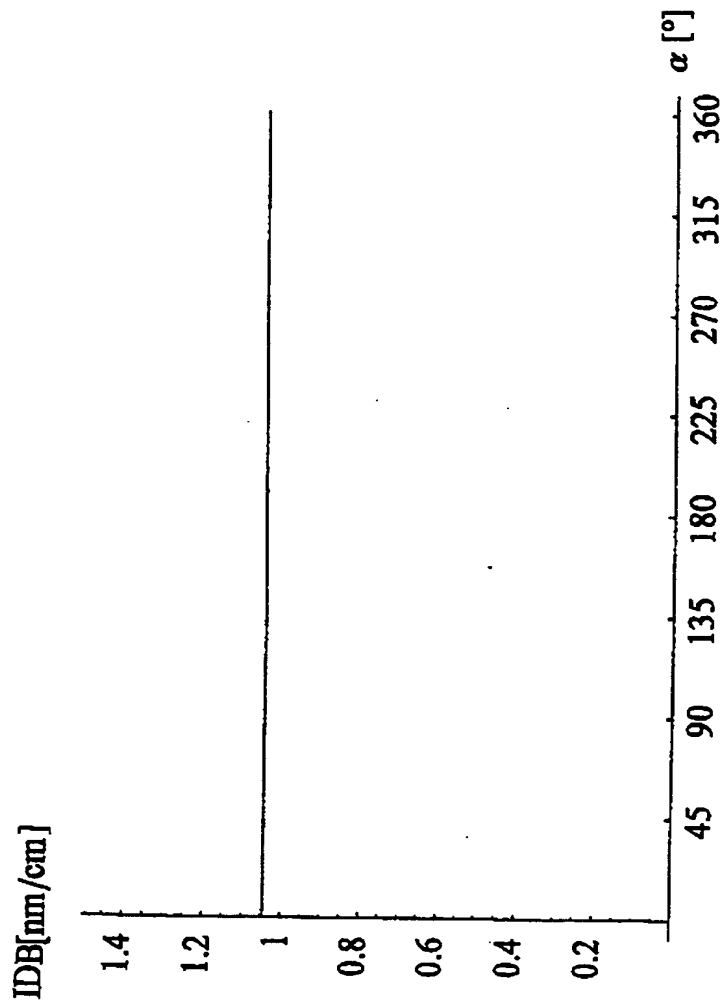


Fig. 6G

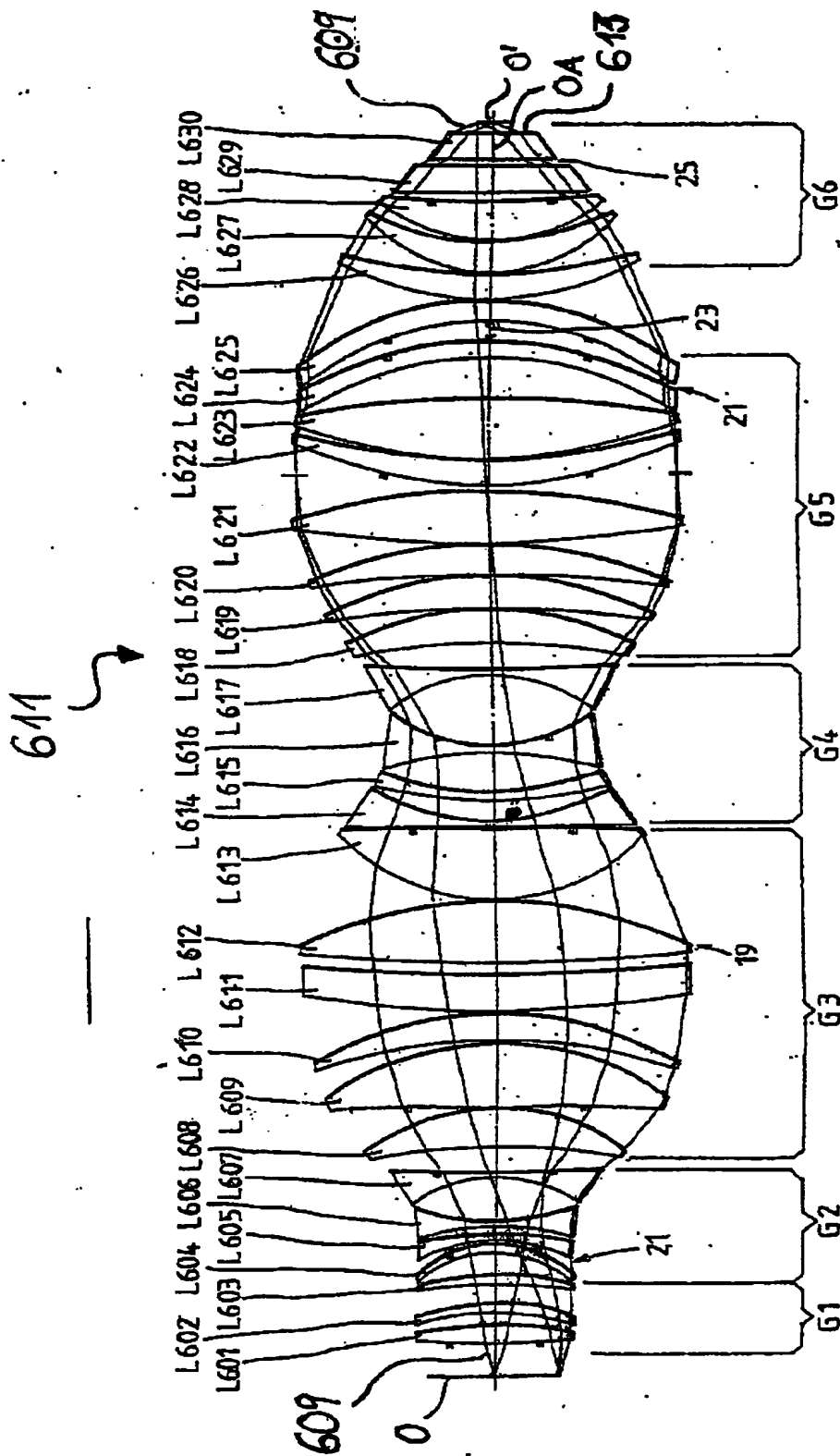


Fig. 7